

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřicí a řídicí techniky

Modelování výměníku tepla
Heat Transfer System Modelling

Zadání bakalářské práce

Student: **Radim Hercík**

Studijní program: B2645 Elektrotechnika, sdělovací a výpočetní technika

Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma: Modelován výměníku tepla
Heat Transfer System Modelling

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky analýzy soustavy pomocí vybrané matematické metody
2. Návrh systému pro analýzu soustavy
3. Řešení systému analyzujícího soustavu v Matlabu
4. Srovnání naměřených, analyzovaných výsledků s teoretickými předpoklady
5. Zhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

1. NEVŘIVA, Pavel. Simulace řídicích systémů na číslicovém počítači. 1975. vyd. Praha 1 : SNTL, 1975. 136 s.
2. SLAVÍČEK, Oldřich. Základní numerické metody. 1964. vyd. Praha : SNTL, 1964 tisk. 350 s.
3. MATĚJKA, Radomír, et al. Výpočet dynamických vlastností přehříváků páry. 1969. vyd. Ostrava : [s.n.], 1969 tisk. 98 s.
4. SEDLÁČEK, Miloš, ŠMÍD, Radislav. Matlab v Měření. Praha : ČVUT, 2005. 204 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Macháček, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2008

Datum odevzdání: 07.05.2009

prof. Ing. Vilém Srovnal, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou/diplomovou práci užít (§35 ods. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské/diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a údaje o bakalářské /diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Macháčkovi, Ph.D. za poskytnutí teoretických podkladů a praktických rad.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá návrhem a realizací systému v prostředí Matlab pro modelování dynamiky výměníku tepla. Hlavním úkolem výměníku tepla je předat energii horkých spalin kotlem vyráběné páře. Velikost předané energie, respektive tepla v čase je dáno dynamikou systému. Dynamika určuje, jak systém reaguje na poruchový stav. Tím se v této souvislosti rozumí skoková změna vstupních veličin. Znalost těchto vlastností je nutná při návrhu řídicího systému nebo regulátoru a umožňuje tak efektivní řízení a regulaci výměníku tepla pro dosažení požadovaných hodnot.

Klíčová slova:

Výměník tepla, ustálený stav, Matlab, dynamika systému, odezva systému

Abstract:

This work deals with design and implementation of the system in the Matlab environment for modeling the dynamics of heat exchanger. The main task of the heat exchanger is to transfer the energy of hot combustion products by steam boiler flue gas. The size of the transmitted energy, or heat over time is determined by the dynamics of the system. The dynamics determines how the system responds to the fault. That in this context means a step change of input values. The knowledge of these characteristics is needed in the design of the control system or controller and enables the effective control and regulation of the heat exchanger to achieve the desired values.

Key word:

The heat exchanger, steady state, Matlab, dynamic system, feedback system

Seznam použitých symbolů a zkratk:

$T(x, t)$ je	teplota, $[grad]$;
M	průtočné množství média, $[kg / s]$;
c_p	měrné teplo média při stálém tlaku, $[kcal / kg * grad]$;
c_s	měrné teplo materiálu přehříváku, $[kcal / kg * grad]$;
α	přestupní součinitel tepla mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem, $[kcal / m^2 * grad]$;
O	povrch teplosměnné plochy připadající na jednotku délky přehříváku ve směru x , $[m]$;
G	váha materiálu teplosměnných ploch připadající na jednotku délky přehříváku ve směru x , $[kg / m]$;
u	průtočná rychlost média ve směru osy x podél teplosměnné plochy, $[m / s]$;
τ	časová konstanta prohřívání média $\tau = \frac{c_p M}{\alpha O u }$, $[s]$;
τ_s	časová konstanta prohřívání materiálu přehříváku $\tau_s = \frac{c_s G}{\alpha O}$, $[s]$;
χ	poměr časových konstant $\chi_1 = \frac{\tau_{s1}}{\tau_{s2}}$; $\chi_2 = \frac{\tau_{s2}}{\tau_{s1}}$;
x	vzdálenost řezu „ x “ přehříváku od jeho začátku, $[m]$;
l	celková délka přehříváku ve směru x , $[m]$;
t	proměnná času počítána od okamžiku vzniku poruchy, $[s]$;

Indexy

1	označuje příslušnost k protékající páře;
2	označuje příslušnost ke spalinám;
s	označuje příslušnost k teplosměnné ploše výměníku tepla

Obsah:

1. Úvod.....	1
2. Rozbor souproudého výměníku tepla.....	3
2.1. Popis fyzikálního modelu výměníku tepla.....	3
2.2. Matematický popis modelu výměníku tepla.....	3
3. Rozbor problematiky řešení pomocí Eulerovy metody.....	5
3.1. Eulerova metoda.....	5
3.2. Řešení systému pomocí Eulerovy metody.....	7
4. Řešení reálného systému v programu Matlab.....	10
4.1. Počáteční podmínky a stav výměníku.....	10
4.2. Algoritmus pro výpočet ustáleného stavu výměníku	11
4.3. Určení přestupního součinitele tepla mezi povrchem teplosměnné plochy a médium..	14
4.4. Výpočet ustáleného stavu výměníku.....	18
4.5. Odezvy teplot modelu na změnu vstupu.....	20
5. Shrnutí výsledků a závěr	30
Literatura.....	31
Seznam příloh	32

1. Úvod

Výměník tepla je zařízení pracující na principu přehřívání páry, kde jedním elementem je kotlem vyráběná pára, druhým horké spaliny. Konstrukčně bývá řešen jako souproudý, protiproudý nebo jako kombinace obou těchto základních typů. Množství a teplota páry i spalin lze při provozu kotle měnit a tím jej řídit. Regulační vlastnosti výměníku se posuzují podle toho, jak na tyto změny reaguje. Regulačními charakteristikami výměníku tepla jsou tedy odezvy výstupní teploty páry na změny průtočných množství a na změny vstupních teplot obou médií. Při regulaci se využívá změn některých z těchto veličin. Pomocí regulátoru jsou tyto změny uskutečňovány a tím je ovládána výstupní teplota přehřáté páry. Obvykle bývá teplota přehřáté páry regulována změnou teploty páry do vstupu výměníku vstřikem kondenzátu. Akční veličinou regulace je zde tedy vstupní teplota páry a další změny jsou poté z hlediska regulace považovány za poruchy. Regulátor ovládá akční veličinu a tím vyrovnává změny teploty způsobené poruchami. Jakost regulace je dána regulačními charakteristikami výměníku, a to charakterem odezvy výměníku na akční veličinu ve srovnání s odezvou na poruchy. Regulační charakteristiky však závisejí na konstrukci samotného výměníku.

Tato práce se zabývá popisem takového modelu především z hlediska matematického a následně jeho řešením. Mezi základní cíle bakalářské práce patří popis fyzikálního modelu spolu s jeho matematickým vyjádřením. Popsání principu Eulerovy metody a možnosti aplikace na řešení dané soustavy. Cílem práce je také vytvoření modelové úlohy v Matlabu. Součástí úlohy je vytvoření a rozbor algoritmu pro numerické řešení soustavy, výpočet ustáleného stavu výměníku a odezev na vstupní poruchy.

Chceme-li výše definovaný model výměníku dále zkoumat, je nutné znát jeho přesný matematický popis. Zejména popis fyzikálních dějů probíhajících uvnitř výměníku. Jednotlivé funkční závislosti a vztahy mezi jednotlivými veličinami lze poté vyjádřit pomocí diferenciálních rovnic. V případě modelování konkrétních reálných výměníků tepla je nutné znát parametry charakterizující tento výměník. Takovými parametry poté jsou například teplota vstupní směsi a spalin, délka přehříváku nebo koeficienty přestupu tepla.

Při řešení takovéto soustavy je také nutno zvolit vhodnou matematickou metodu. Jako vhodné metody pro řešení na číslicovém počítači jsou metody numerické. Při řešení na číslicovém počítači je nezbytné užití metody, kterou lze snadno algoritmizovat. V této práci se využívá Eulerovy metody řešení diferenciálních rovnic, které tuto podmínku splňuje. Tato metoda je jednokroková a poskytuje dostatečnou přesnost výpočtu.

Při zápisu samotného algoritmu do počítače byl využit program Matlab který je silným nástrojem pro simulaci nejrůznějších fyzikálních a matematických dějů. Umožňuje pomocí jednoduchého zápisu kódu realizovat složité matematické problémy a to využitím kombinace programovacího jazyka C a vlastních speciálních instrukcí a funkcí. Při zápisu kódu se využije základních instrukcí, které ukazují princip výpočtu a způsob vykonávání algoritmu řešení v jednotlivých krocích.

Výměník je modelován pro reálný systém se známými parametry s uvedením výstupních dynamických charakteristik.

Pro simulaci dynamiky výměníku tepla je nutné znát jeho ustálený stav, tedy stav kdy již nedochází k přechodovému ději, respektive ke změnám teploty v jednotlivých místech výměníku v čase. Dynamikou systému rozumíme rychlost, jakou se systém při přivedení poruchové veličiny opět ustálí. Proto je nezbytné nejprve takovýto ustálený stav určit. V opačném případě může docházet k nepřesným a nesprávným výpočtům.

Při určování ustáleného stavu je nutno mimo jiné znát přestupní součinitel tepla mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem α . Tato konstanta je dána povrchem teplosměnné plochy, přičemž v praxi ji nelze přesně určit ale pouze přibližně odhadnout. Při návrhu reálného modelu je pro prvotní návrh takovýto odhad dostatečný. Při simulaci takového modelu je potřeba určit tento koeficient přesněji. Tato práce ukazuje způsob určení tohoto koeficientu na základě znalosti vstupních a výstupních teplot horkých spalín a směsi.

Obecně platí, že výměník tepla má relativně pomalou dobu změn, která je dána velkými časovými konstantami přestupu tepla. Z tohoto důvodu musí být simulace prováděna po dostatečně dlouhou dobu.

2. Rozbor souproudého výměníku tepla

2.1. Popis fyzikálního modelu výměníku tepla

Výměník tepla je zařízení, ve kterém dochází k přehřívání páry a to tak že jedním médiem jsou proudící spaliny a druhým kotlem vyráběná pára. Konstrukčně bývá řešen jako souproudý kde se horké spaliny a pára pohybují stejným směrem, nebo protiproudý kde se horké spaliny a pára pohybují ve směru navzájem opačném. Ve výměníku musí být proudící pára a horké spaliny odděleny. Výměník tepla bývá realizován tak, že proudící pára je uzavřena v potrubí, které je vhodně umístěno uvnitř výměníku, a kolem těchto potrubí proudí horké spaliny. Horké spaliny předávají přes teplosměnné plochy potrubí svou energii páře. Proto je snahou tyto plochy maximalizovat a pro potrubí využít materiály s co největší teplotní vodivostí. Jako vhodný materiál se jeví kov, který je ve většině výměníků použit. Konstruktor výměníků musí brát při návrhu v úvahu teplotní roztažnosti materiálů protože výměník tepla pracuje z velmi vysokými teplotami a teplotními změnami.

2.2. Matematický popis modelu výměníku

Výměník tepla si lze představit jako matematický model popsaný soustavou rovnic. Rovnice popisují vlastnosti výměníku, udávají vztah mezi jednotlivými veličinami.

Výměník tepla je zařízení, které má za úkol předávat teplo horkých spalin směsí. Matematický popis tak musí popsat, jakým způsobem se teplo přenáší. Tento přenos závisí na mnoha parametrech. Mezi základní parametry patří vlastnosti horkých spalin a směsi, konkrétně velikost měrného tepla média při stálém tlaku c_p a průtočná rychlost média u spolu s průtočným množstvím média M . Výměník je realizován tak, že horké spaliny a směs jsou navzájem odděleny pevnou stěnou. Stěna je charakterizována velikostí měrného tepla materiálu c_s , dále váhou materiálu teplosměnných ploch G a na povrchu teplosměnné plochy O připadající na jednotku délky výměníku. Protože teplo je předáváno přes pevnou stěnu je zaveden přestupní součinitel tepla α mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem. Tyto parametry udávají velikost časových konstant prohřívání média a materiálu výměníku.

Časové konstanty prohřívání média τ a prohřívání materiálu výměníku τ_s jsou dány následujícími vztahy:

$$\tau = \frac{c_p M}{\alpha O |u|} \quad (1)$$

$$\tau_s = \frac{c_s G}{\alpha O} \quad (2)$$

Výměník je popsán parciálními diferenciálními rovnicemi. Rovnice jsou vztahem pro přibližný výpočet regulačních charakteristik. Rovnice mají stejný tvar jak pro souproudý tak pro protiproudý výměník.

Základní diferenciální rovnice výměny tepla v souproudém či protiproudém výměníku tepla mají tento tvar [5]:

$$T_s - T_1 = \tau_1 \left[u_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_1}{\partial t} \right] \quad (3)$$

$$T_s - T_2 = \tau_2 \left[u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial t} \right] \quad (4)$$

$$\frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}} = \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (5)$$

Teoretický rozbor nestacionárních pochodů ve výměníku tepla ukazuje, že jeho regulační charakteristiky závisejí celkem na pěti bezrozměrných veličinách. [5]

$$\frac{\tau_{20} u_{20}}{\tau_{10} u_{10}}; \quad \chi_{10}; \quad \frac{l}{\tau_{10} u_{10}}; \quad \frac{\tau_{10}}{\tau_{20}}; \quad \frac{\tau_{s10}}{\tau_{10}};$$

První tři veličiny určují statické charakteristiky výměníku, tj. rozložení teplot podél osy výměníku ve stacionárním stavu.

Výše uvedený popis je dostačující pro modelování dynamiky výměníku. Rovnice 4, 5 a 6 udávají vztah mezi teplotou horkých spalín a směsí. Při znalosti vstupních teplot a rychlosti horkých spalín a směsi a také časových konstant přestupu tepla jsme schopni vypočítat rozložení teplot ve výměníku v ustáleném stavu. V této souvislosti také rychlost a průběh odezvy na poruchový stav.

Popis pomocí parciálních diferenciálních rovnic vyžaduje znalost vhodné matematické metody. Taková metoda musí být snadno zapsatelná do strojového kódu. Při výběru vhodné metody řešení se musí přihlížet k náročnosti jejího výpočtu na číslicovém počítači. V této souvislosti je nutné uvážit o pro jaký typ číslicového počítače bude výpočetní program určen. Tato práce se zabývá simulací úlohy na číslicovém počítači třídy PC.

3. Rozbor problematiky řešení pomocí Eulerovy metody

Při simulaci dynamických systémů vyjádřených soustavou diferenciálních rovnic se používá řada numerických metod. Metody lze rozdělit podle mnoha kritérií do různých skupin a zabývat se jejich přesností a náročností řešení.

Při řešení se využije jednokrokové metody, kde lze nový bod řešení určit na základě předchozího stavu. Jednokroková metoda se volí z ohledem na jednoduchost při přepisu do strojového kódu. Jedním z nejjednodušších představitelů jednokrokových metod je *Eulerova metoda*. [1]

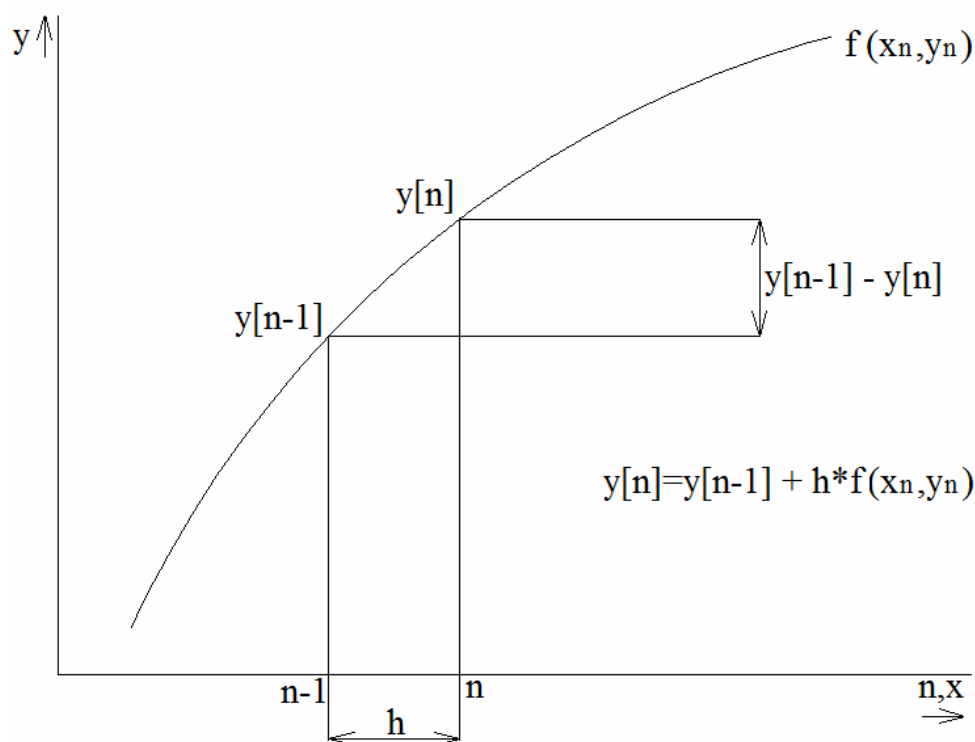
3.1. Eulerova metoda

Eulerova metoda je nejjednodušší metodou numerického řešení obyčejných diferenciálních rovnic s danými počátečními podmínkami. Publikoval ji švýcarský matematik a fyzik Leonhard Euler v roce 1768.

Principem metody je určení následujícího vztahu na základě předchozího bodu řešení.

Řešení Eulerovy metody je graficky znázorněno na obrázku 1. Grafické znázornění ukazuje obecný průběh funkce v souřadnicovém systému. K tomuto zobrazení se vztahuje vyznačení změny hodnoty funkce v závislosti na velikosti integračního kroku. Obecně platí, že čím je integrační krok menší, tím přesnější je aproximace hledaného průběhu funkce.

Mějme diferenciální rovnici 1. řádu $y' = f(y, x)$, která je spojitá a splňuje Lipschitzovu podmínku jednoznačnosti řešení. Potom pro počáteční podmínku $y(x_0) = y_0$ existuje právě jedno řešení rovnice $y' = f(y, x)$. Při výpočtu na počítači dostáváme přibližné partikulární řešení pro zvolené hodnoty argumentu x . K zadané počáteční podmínce $y(x_0) \doteq y_0 = y(x_0)$ lze z rovnice $y' = f(y, x)$ určit hodnotu $f(y_0, x_0) \doteq f_0 = f(y_0, x_0)$. Aproximujeme-li řešení v bodě (x_0, y_0) přímkou, tj. polynomem prvního stupně, lze pro zvolený bod x_1 stanovit přibližně hodnotu partikulárního integrálu v tomto bodě jako $y(x_1) \doteq y_1 = y_0 + h_1 f(y_0, x_0)$, kde $h_1 = x_1 - x_0$ je zvolený přírůstek argumentu x („délka integračního kroku“) [1]. Výše popsané řešení je ukázáno na obrázku číslo 1.



Obr. 1 Eulerova metoda

Bod (x_1, y_1) je novým výchozím bodem řešení $y(x_2) = y_2 = y_1 + h_2 f(y_1, x_1)$, kde $h_2 = x_2 - x_1$.

Přesnost metody je také závislá na velikosti zvoleného integračního kroku h . Je potřeba zvolit optimální velikost kroku, pokud je integrační krok h zvolen příliš veliký, dojde k rozkmitání řešení soustavy a tím k chybnému výpočtu.

Opakováním postupu se získá známá Eulerovu formule:

$$y(x_{n+1}) = y_{n+1} = y_n + h_{n+1} f(y_n, x_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6) \quad , \text{kde}$$

$n + 1$	je	pořadové číslo integračního kroku,
$h_{n+1} = x_{n+1} - x_n$		přírůstek argumentu x v $(n + 1)$ -ním kroku, tj. délka integračního kroku,
x_n		hodnota nezávislé proměnné v n -tém kroku
y_n		hodnota numerického řešení v bodě x_n získaná v n -tém integračním kroku, aproximující přesnou hodnotu řešení $y(x_n)$
y_{n+1}		hodnota numerického řešení v $(n + 1)$ -ním kroku,

3.2. Řešení systému pomocí Eulerovy metody

Systém je zadán pomocí vzorců pro přibližný výpočet regulačních charakteristik. Vztahy jsou vyjádřeny pomocí diferenciálních rovnic, které určují vztah mezi jednotlivými veličinami systému protiproudého či souproudého výměníku tepla (3,4,5). [5]

$$T_s - T_1 = \tau_1 \left[u_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_1}{\partial t} \right]$$

$$T_s - T_2 = \tau_2 \left[u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial t} \right]$$

$$\frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}} = \frac{\partial T_s}{\partial t}$$

Eulerova metoda poskytuje nástroje jak tyto rovnice řešit.

Pro určení průběh jednotlivých teplot a to jak při dynamickém tak při ustáleném stavu, se musí z rovnic vyjádřit závislosti jednotlivých teplot na čase, $\frac{\partial T}{\partial t}$.

Vyjádřením příslušných závislostí $\frac{\partial T_1}{\partial t}$, $\frac{\partial T_2}{\partial t}$ a $\frac{\partial T_s}{\partial t}$ se dostanou následující vztahy:

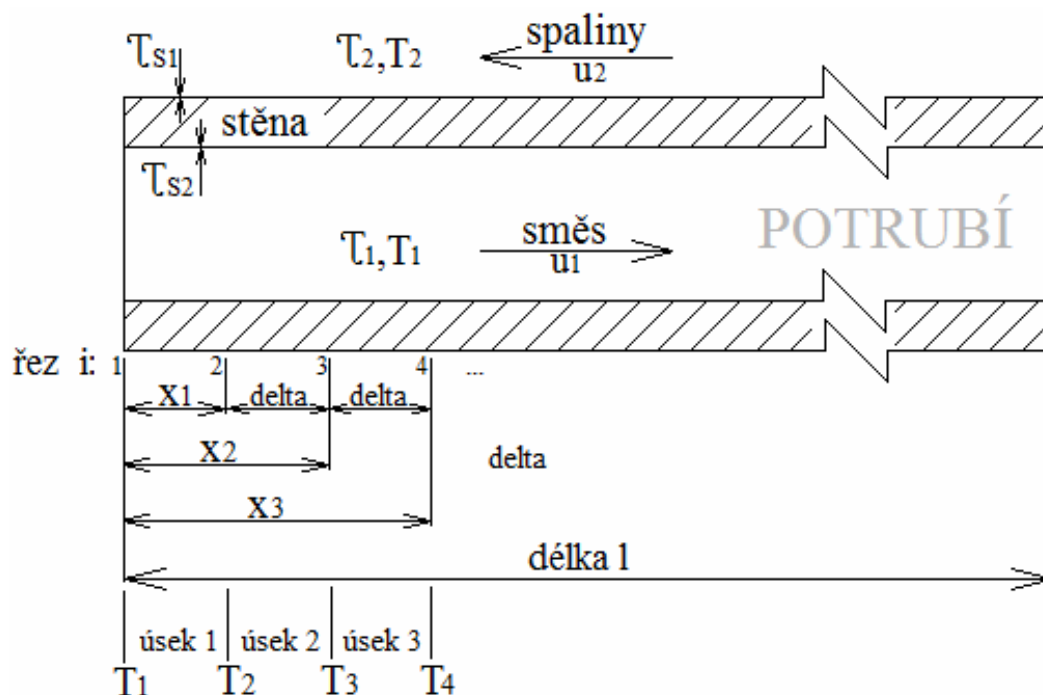
$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{T_s - T_1}{\tau_1} - u_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{T_s - T_2}{\tau_2} - u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}} \quad (9)$$

Protože se v diferenciálních rovnicích vyskytuje také závislost teploty na vzdálenosti od počátku, musí se zvolit matematický model, který tuto závislost blíže definuje.

Nákres zadaného zjednodušeného modelu výměníku je zobrazen na obrázku 2. Skládá se z potrubí, proudící směsi a proudících spalín. Potrubí odděluje proudící spaliny a směs. Ve zjednodušeném modelu výměníku je potrubí po celé své délce rovné. Směs proudí uvnitř potrubí. Spaliny proudí kolem potrubí. Směs a spaliny proudí ve směru navzájem opačném.



Obr. 2 Zjednodušený model výměníku

Musí se zvolit vhodný počet vzorků, na které se bude model dělit. Ve vztahu k požadované přesnosti řešení a rychlosti výpočtu se model rozdělí na 20 dílů. Jednotlivé úseky mají konstantní délku δ , která je dána podílem délky modelu k počtu úseků, na které je model rozdělen. Jednotlivé úseky jsou rozděleny pomocí řezů, které se označí symbolem i , kde počátek výměníku je označen řezem č.1 a konec modelu výměníku je označen řezem č.21. Závislost $\frac{\partial T}{\partial x}$ lze vyjádřit dle obrázku 2 následujícím způsobem:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{T_{1(i+1)} - T_{1(i-1)}}{2 * \delta} \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{T_{2(i+1)} - T_{2(i-1)}}{2 * \delta} \quad (11)$$

Pro počátek modelu tyto vztahy musejí být upraveny, protože pro $T_{(i-1)}$ není hodnota definována. Podobně tomu je pro konec modelu výměníku kde není definována hodnota pro $T_{(i+1)}$. Zde mají proto

vztahy pro výpočet $\frac{\partial T}{\partial x}$ následující tvar :

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{T_{1(i+1)} - T_{1(i)}}{\delta} ; \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{T_{1(i)} - T_{1(i-1)}}{\delta} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{T_{2(i+1)} - T_{2(i)}}{\delta} ; \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{T_{2(i)} - T_{2(i-1)}}{\delta} \quad (13)$$

Dosazením vyjádřené závislosti $\frac{\partial T_1}{\partial x}$ a $\frac{\partial T_2}{\partial x}$ do diferenciálních rovnic se dostane formule vhodná pro řešení pomocí Eulerovy metody.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{T_s - T_1}{\tau_1} - u_1 \left[\frac{T_{1(i+1)} - T_{1(i-1)}}{2 * delta} \right] \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{T_s - T_2}{\tau_2} - u_2 \left[\frac{T_{2(i+1)} - T_{2(i-1)}}{2 * delta} \right] \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}} \quad (16)$$

Pro počátek a konec modelu výměníku je nutno dosadit $\frac{\partial T_1}{\partial x}$ a $\frac{\partial T_2}{\partial x}$ v korigovaném tvaru.

Pro počátek modelu mají poté rovnice tvar:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{T_s - T_1}{\tau_1} - u_1 \left[\frac{T_{1(i+1)} - T_{1(i)}}{delta} \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{T_s - T_2}{\tau_2} - u_2 \left[\frac{T_{2(i+1)} - T_{2(i)}}{delta} \right] \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}} \quad (19)$$

Pro konec modelu mají poté rovnice tvar:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{T_s - T_1}{\tau_1} - u_1 \left[\frac{T_{1(i)} - T_{1(i-1)}}{delta} \right] \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{T_s - T_2}{\tau_2} - u_2 \left[\frac{T_{2(i)} - T_{2(i-1)}}{delta} \right] \quad (21)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}} \quad (22)$$

4. Řešení reálného systému v programu Matlab

4.1. Počáteční podmínky a stav výměníku

Výměník tepla lze popsat výše uvedeným způsobem. V praxi však nelze zcela přesně určit velikosti daných konstant jako měrné teplo materiálu nebo tepelná vodivost. Je to dáno především technologií výroby. Při návrhu reálného systému jsou tyto hodnoty přibližně známy, případně odhadnuty tak aby se co nejvíce blížili reálné hodnotě. V dále uvedeném případě byli, na již realizované výměníku tepla neměřeny a určeny některé hodnoty. Naměřeny byli vstupní a výstupní hodnoty teplot, rychlost a směr spalin a směsi a určeny některé z konstant.

Na reálném modelu byli určeny a změřeny následující hodnoty [5]:

$$M_1 = 3,04 \quad [kg / s];$$

$$M_2 = 3,4244 \quad [kg / s];$$

$$c_{p1} = 1109,2 \quad [J / kg * K];$$

$$c_{p2} = 1196,6 \quad [J / kg * K];$$

$$c_s = 550 \quad [J / kg * K];$$

$$u_1 = 11,3 \quad [m / s];$$

$$u_2 = -7,23 \quad [m / s];$$

$$O_1 = 6,58 \quad [m];$$

$$O_2 = 7,58 \quad [m];$$

$$G = 364 \quad [kg / m];$$

$$l = 57,6 \quad [m];$$

Vstupní teploty mají hodnotu:

$$T_{1(0)} = 94,5 \quad [^{\circ}C];$$

$$T_{2(l)} = 461,3 \quad [^{\circ}C];$$

Výstupní teploty mají hodnotu:

$$T_{1(l)} = 441,3 \quad [^{\circ}C];$$

$$T_{2(0)} = 175,0 \quad [^{\circ}C];$$

Hodnoty součinitelů tepla mezi povrchem teplosměnné plochy a médii α_1 a α_2 uvedeny nejsou.

Hodnoty výstupních teplot jsou odměřeny v ustáleném stavu.

Ze zadaných hodnot u_1 a u_2 je zřejmé že se jedná o protiproudý výměník. Hodnoty přestupního součinitele tepla mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem α_1 a α_2 lze vypočítat. Protože k určení těchto hodnot je potřeba vysoké množství matematických operací, využijeme k jejich výpočtu číslicového počítače.

4.2. Algoritmus pro výpočet ustáleného stavu výměníku

Pro výpočet ustáleného je nutno znát právě hodnoty α_1 a α_2 . Přestože jsou tyto hodnoty v tomto okamžiku neznámé je sestavení algoritmu pro výpočet ustáleného stavu klíčovou záležitostí. Proto je navržen algoritmus pro výpočet těchto konstant. Jsou známy výstupní a vstupní teploty výměníku. Koeficienty lze určit tak, že se provádí odhad jejich maximální a minimální hodnot, které mohou nabývat. Jednotlivé hodnoty z odhadnutého intervalu se dosazují postupně do algoritmu, kde se následně provede výpočet. Porovná se výsledek výpočtu z požadovanými hodnotami. Na základě tohoto porovnání se vybere dvojici hodnot α_1 a α_2 , která po provedení výpočtu dosahuje nejmenší odchylky od žádaných výstupní teplot.

Při sestavování algoritmu řešícího výpočet do ustáleného stavu jsou využity rovnice (14,15,16) odvozené v kapitole 3.2.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{T_s - T_1}{\tau_1} - u_1 \left[\frac{T_{1(i+1)} - T_{1(i-1)}}{2 * \text{delta}} \right]$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{T_s - T_2}{\tau_2} - u_2 \left[\frac{T_{2(i+1)} - T_{2(i-1)}}{2 * \text{delta}} \right]$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_1 - T_s}{\tau_{s1}} + \frac{T_2 - T_s}{\tau_{s2}}$$

Tyto rovnice vyjadřují závislost teploty na čase. Použitím Eulerovy formule (6) $y(x_{n+1}) = y_{n+1} = y_n + h_{n+1} f(y_n, x_n)$ kde $f(y_n, x_n)$ jsou právě výše uvedené rovnice, lze snadno určit velikost teplot v následujícím časovém okamžiku. Velikost časového kroku je dána velikostí integračního kroku h . Velikost změny $\frac{\partial T_1}{\partial t}$, $\frac{\partial T_2}{\partial t}$ a $\frac{\partial T_s}{\partial t}$ v řezu i podle Eulerovy formule se zohlední.

Obecně platí:

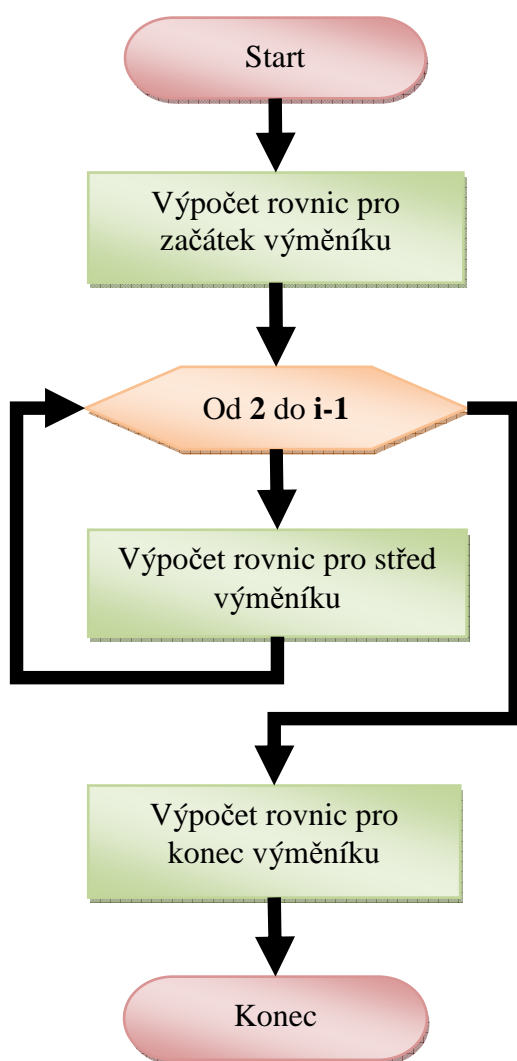
$$T(i, t + h) = T(i, t) + h * \left(\frac{\partial T(i, t)}{\partial t} \right) \quad (23)$$

Tímto způsobem se získá nová velikost teploty v čase.

K zahájení výpočtu je potřeba znát funkci $f(y_n, x_n)$ a počáteční podmínky, respektive teploty ve výměníku. Tyto teploty se odhadnou. Mohou mít libovolnou velikost, avšak pro zrychlení výpočtu je vhodné zvolit pravděpodobné reálné hodnoty.

Výše uvedené rovnice (14,15,16) vyjadřují závislost teploty na čas ovšem v konkrétním místě výměníku $\frac{\partial T_1}{\partial x}$ a $\frac{\partial T_2}{\partial x}$. Jakým způsobem je výměník matematicky rozdělen je patrné z obrázku číslo 2. Při výpočtu se musí tato závislost na délce výměníku respektovat. Proto je výpočet těchto rovnic proveden tolikrát, na kolik řezů je model rozdělen. Každým výpočtem se získá velikost teploty v místě řezu v čase $t + h$.

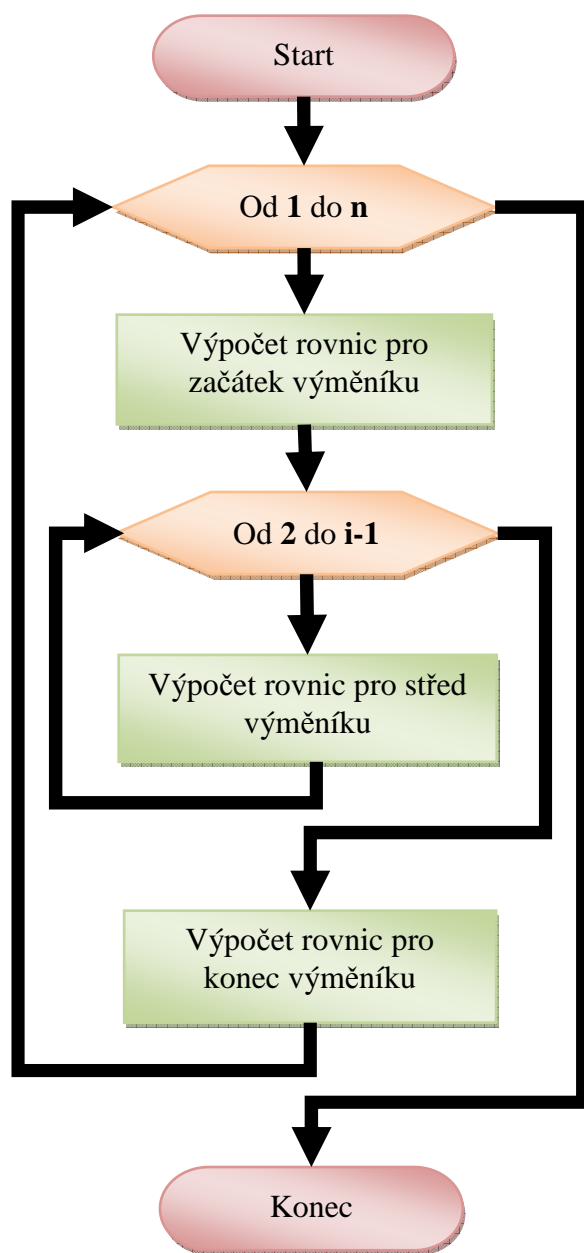
V rovnicích je příslušnost k danému řezu označena indexem i . Jak je uvedeno v kapitole 3.2 je nutno respektovat tvar rovnice pro okraj výměníku kde není k dispozici hodnota $T_{1(i+1)}$ nebo $T_{1(i-1)}$. V této kapitole je uveden upravený tvar těchto rovnic (17,18,19,20,21,22). Vývojový diagram takového výpočtu ukazuje obrázek 3.



Obr. 3 Vývojový diagram – výpočet teplot v čase $t+h$

Tímto algoritmem se určí hodnoty teplot po celé délce výměníku v čase $t+h$ kde h je velikost integračního kroku. Integrační krok h je vhodné zvolit dostatečně malý, aby nedocházelo ke zkreslení výpočtu a zároveň dostatečně velký aby se neúměrně neprodlužoval čas výpočtu. Zpravidla bývá volen v rozmezí 0,1 až 0,001 dle požadavků na přesnost.

Výměník tepla je zařízení s vysokou teplotní setrvačností. Je tak potřeba simulovat změny teploty po dostatečně dlouhou dobu, respektive do okamžiku kdy se ustálí a v jednotlivých místech výměníku již nedochází k teplotním změnám. V modelovaném systému představuje velikost integračního kroku velikost času. Algoritmus uvedený na obrázku 3 je tak nutno mnohokrát opakovat. Blokové schéma výpočtu ukazuje obrázek číslo 4, kde n je počet integračních kroků které musejí být provedeny.



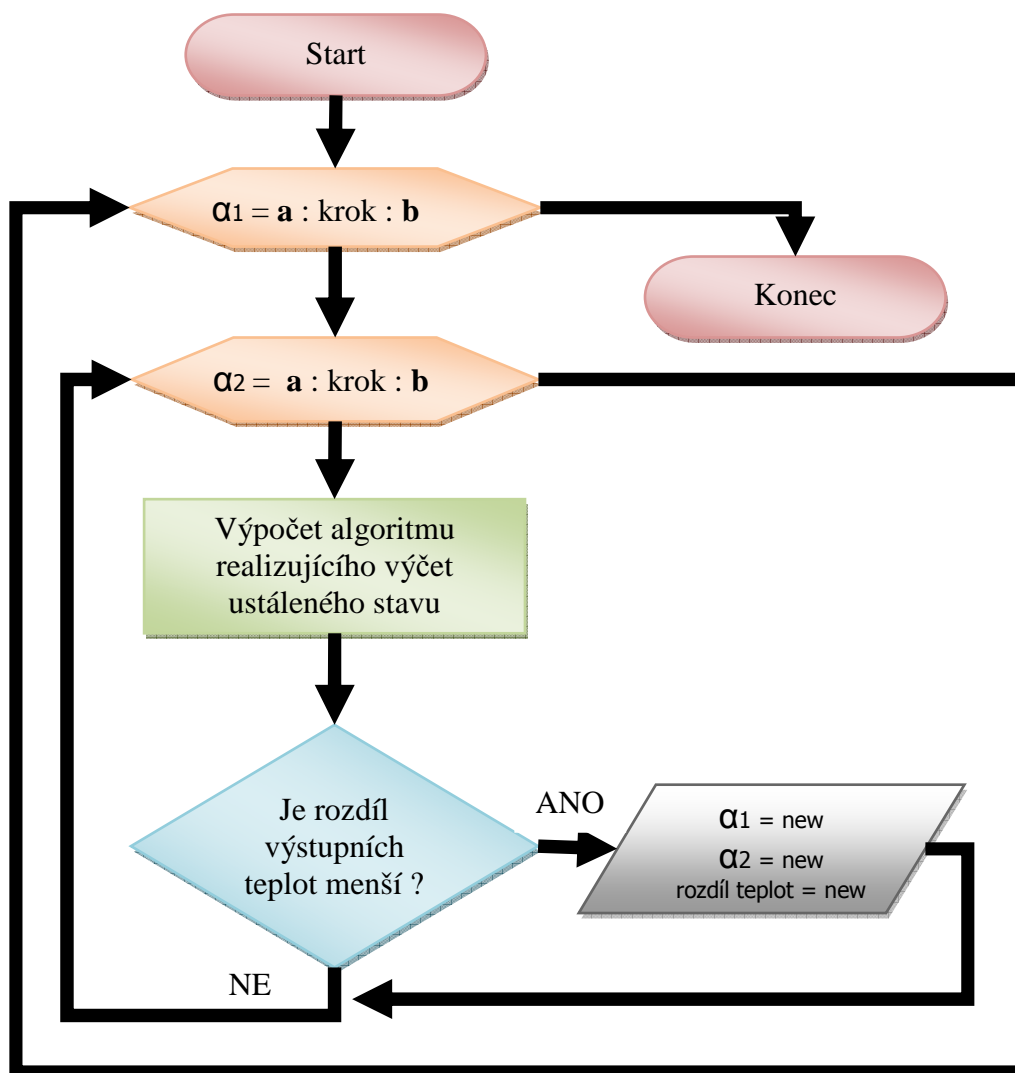
Obr. 4 Vývojový diagram – výpočet teplot v čase $t+(n \cdot h)$

4.3. Určení přestupního součinitele tepla mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem

Hodnoty teplotních součinitelů α_1 a α_2 zadány nejsou. Tyto hodnoty je obtížné odhadnout nebo odměřit protože závisí na mechanické konstrukci a vlastnostech použitých materiálů.

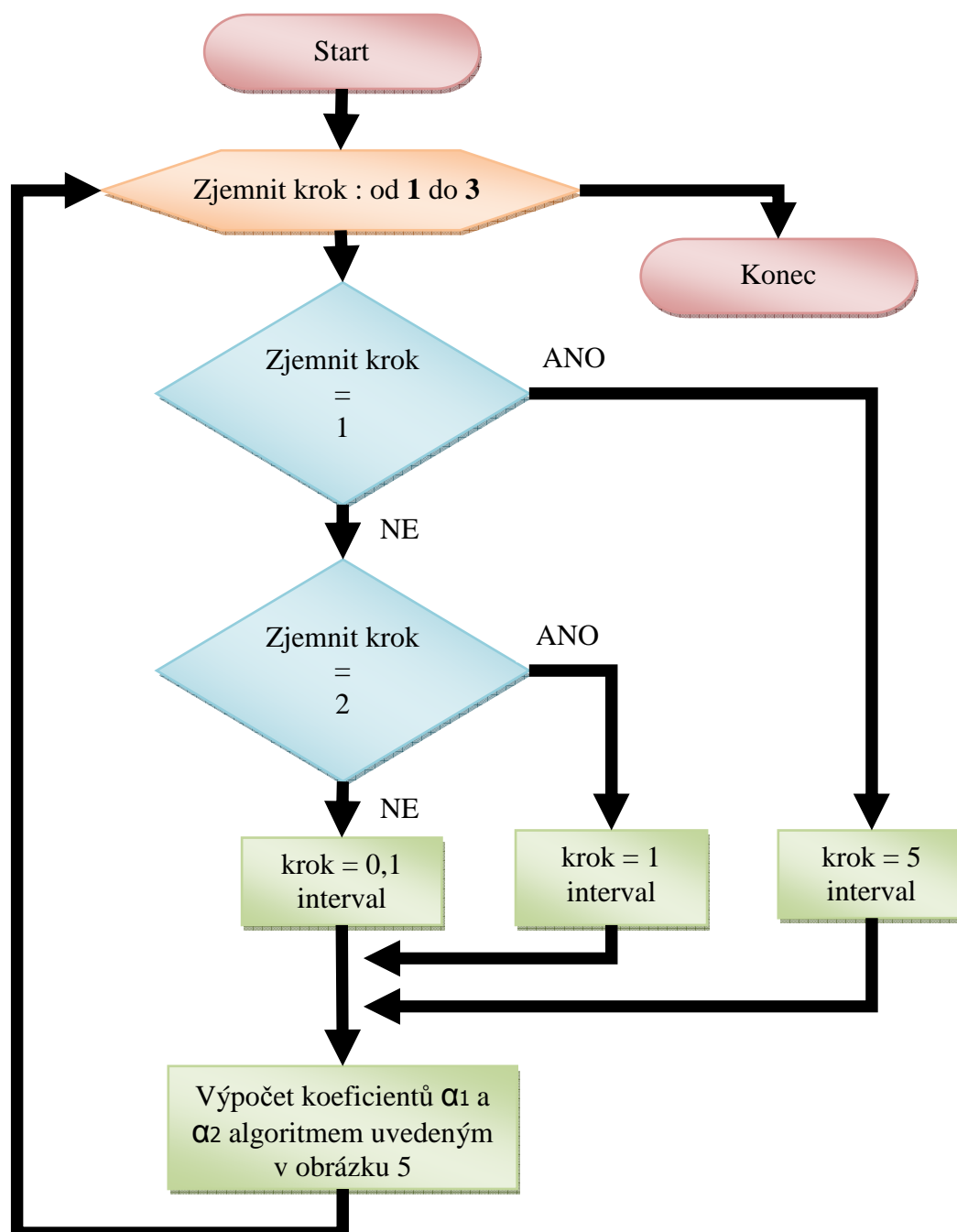
Abychom mohli určit tepelnou dynamiku výměníku je potřeba tyto hodnoty znát. Pro výpočet těchto součinitelů lze snadno využít algoritmus realizující výpočet do ustáleného stavu a to právě proto že jsou nám známy velikosti vstupních a výstupních teplot v ustáleném stavu.

Je navrhnut algoritmus, který tento výpočet řeší. Princip určení přestupních součinitelů tepla mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem spočívá v postupném dosazování součinitelů z odhadnutého intervalu do algoritmu pro výpočet ustálené stavu z následným porovnáním výsledných výstupních teplot oproti naměřeným výstupním teplotám na reálném výměníku. Dvojice koeficientů u které je nejmenší rozdíl mezi žádanou a vypočtenou teplotou je poté vyhodnocena jako nejlépe navržená dvojice těchto konstant. Celková odchylka od žádaných hodnot by neměla překročit 5 %. Obrázek 5 ukazuje blokové schéma takového výpočtu.



Obr. 5 Vývojový diagram – určení koeficientů alfa

Interval hodnot, ze kterého jsou postupně dosazovány dvojice teplotních součinitelů α_1 a α_2 je volen tak aby odpovídal reálným hodnotám, které mohou koeficienty nabývat. Vzhledem k časové náročnosti výpočtu je vhodné algoritmus uvedený v obrázku 5 optimalizovat. Řešením je změna kroku dosazovaných dvojic koeficientů α_1 a α_2 . Nejprve se provede výpočet dvojice koeficientů z celého intervalu z velkým krokem změny hodnot α_1 a α_2 , poté se krok sníží a hodnota α_1 a α_2 je vybírána z redukovaného interval s ohledem na předchozí výpočet. Tento postup zjemňování kroku lze vícekrát opakovat. Princip změny kroku je uveden v obrázku 6. Lze tak dosáhnout podstatného snížení cyklů nutných k prohledání celého počátečního intervalu hodnot.



Obr. 6 Vývojový diagram – optimalizace kroku při určování koeficientů alfa

Kód programu je napsán v programovém prostředí Matlabu. Matlab poskytuje prostředky pro snadný zápis programu a následné analýze výsledků. Při přepisu vývojového diagramu do programového kódu je potřeba dodržet jistou strukturu řešení a kód uspořádat tak aby pro jeho vykonání bylo potřeba co nejmenší množství instrukcí.

Při zápisu základních rovnic je vhodné nejprve vypočíst velikosti časových konstant τ . Tato hodnota je poté v průběhu výpočtu konstantní a je proto neefektivní tento výpočet cyklicky opakovat. Kód lze zapsat v následujícím tvaru:

```
tau1=(cp1*M1)/(alfa1*O1*abs(u1)); % čas. konst. prohřívání páry
tau2=(cp2*M2)/(alfa2*O2*abs(u2)); % čas. konst. prohřívání spaliny
tauS1=(cs*G)/(alfa1*O1); % čas. konst. prohřívání materiálu
tauS2=(cs*G)/(alfa2*O2); % čas. konst. prohřívání materiálu
```

Nyní lze snadno zapsat rovnice z užitím Eulerovy formule. Kód je uveden pro rovnice řešící výpočet střední části výměníku.

```
%teplota spalin:
dTkudt=( ( TS(i)-T2(i) )/tau2 - u2 * ( T2(i+1) - T2(i-1) )/delta/2 );
T2(i)=T2(i)+h* dTkudt;
%teplota smesi
dTkudt=( ( TS(i)-T1(i) )/tau1 - u1 * ( T1(i+1) - T1(i-1) )/delta/2 );
T1(i)=T1(i)+h* dTkudt;
%stena
dTkudt=(T1(i)-TS(i))/tauS1 + (T2(i)-TS(i))/tauS2;
TS(i)=TS(i)+h*dTkudt;
```

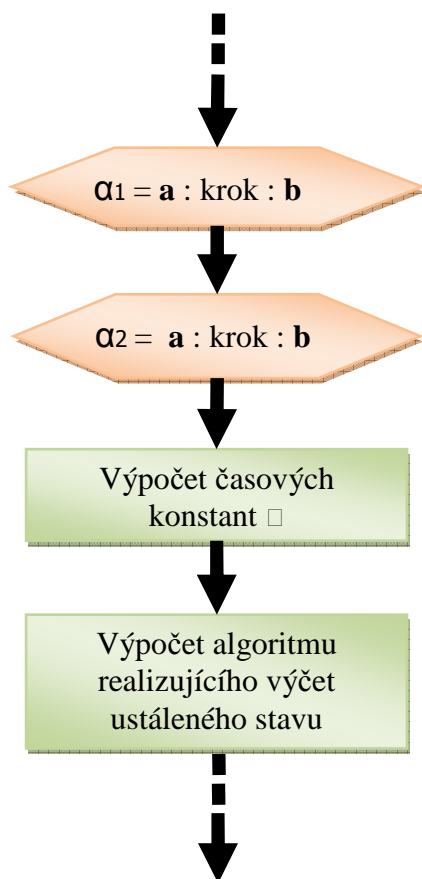
Obdobně lze zapsat rovnice pro okrajové části výměníku tepla. Z rovnic realizující výpočty časových konstant τ je patrné že závisejí na velikosti koeficientů α_1 a α_2 . Při zápisu algoritmu realizujícího výpočet koeficientů α_1 a α_2 je proto nutné umístit tento blok kódu přímo před část realizující výpočet ustáleného stavu (obrázek 7).

Posledním krokem je vykreslení a zobrazení vypočtených hodnot. Matlab poskytuje prostředky pro snadné zobrazení výsledku do grafu. Následující kód ukazuje, jakým způsobem lze vykreslit vypočtený vektor teplot do dvourozměrného grafu.

```
figure(1) % vytvoření nového okna pro umístění grafu
set(1,'color','white') % nastavení vlastností grafu
plot(TEPLOTA) % vykreslení požadovaného vektoru hodnot
ylabel('Teplota [°C]'); % zobrazení popisu osy y v grafu
xlabel('Cas [min]'); % zobrazení popisu osy x v grafu
grid on % zobrazení pomocné mřížky v grafu
```

Následující kód ukazuje, jakým způsobem lze vykreslit vypočtenou matici hodnot do 3D grafu.

```
figure(2) % vytvoření nového okna pro umístění grafu
set(2,'color','white') % nastavení vlastností grafu
waterfall (x,y,TEPLOTA); % vykreslení hodnot
zlabel('\Delta T [°C]'); % zobrazení popisu osy z v grafu
ylabel('Delka [m]'); % zobrazení popisu osy y v grafu
xlabel('Cas [min]'); % zobrazení popisu osy x v grafu
AXIS([0 200 -60 0 0 10]) % nastavení rozsahu osy x,y,z
```



Obr. 7 Vývojový diagram – uspořádání bloků pro vykonávání programem

Pro námi zadané hodnoty se dostane velikost $\alpha_1 = 106,9$ a $\alpha_2 = 179,1$. Velikost žádaných výstupních hodnot jsou:

$$T_{1(l)} = 441,3 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{2(0)} = 175,0 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

Program určil jako výsledné výstupní teploty pro nejlépe vyhovující koeficienty α_1 a α_2 následovně:

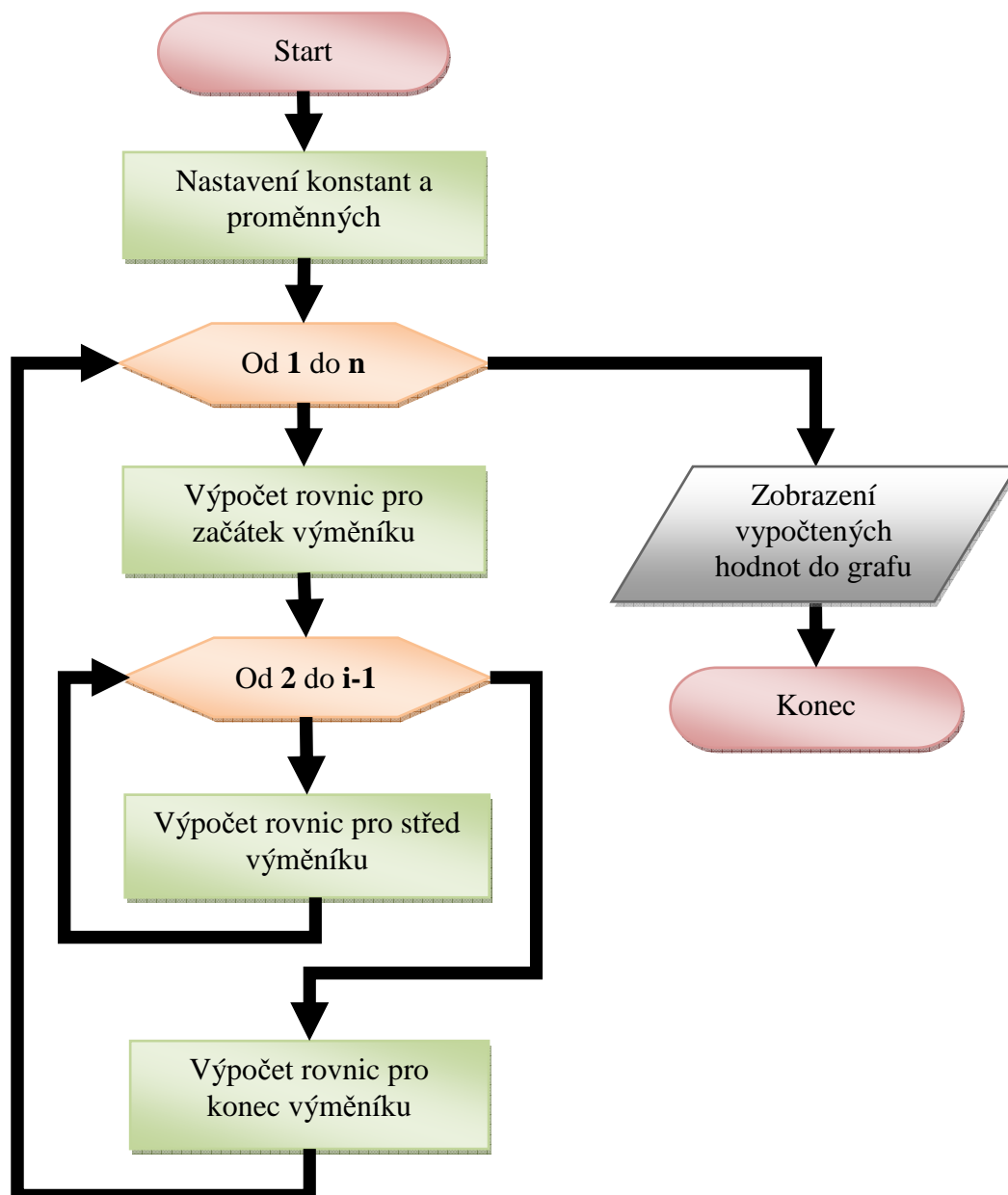
$$T_{1(l)} = 441,301 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{2(0)} = 175,9156 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

Takto navržené konstanty vnášejí do systému odchylky. Odchylka výstupní teploty směsi je 0,00023 % a odchylka výstupní teploty spalin je 0,5232 %. Navržené konstanty vyhovují požadavkům na přesnost.

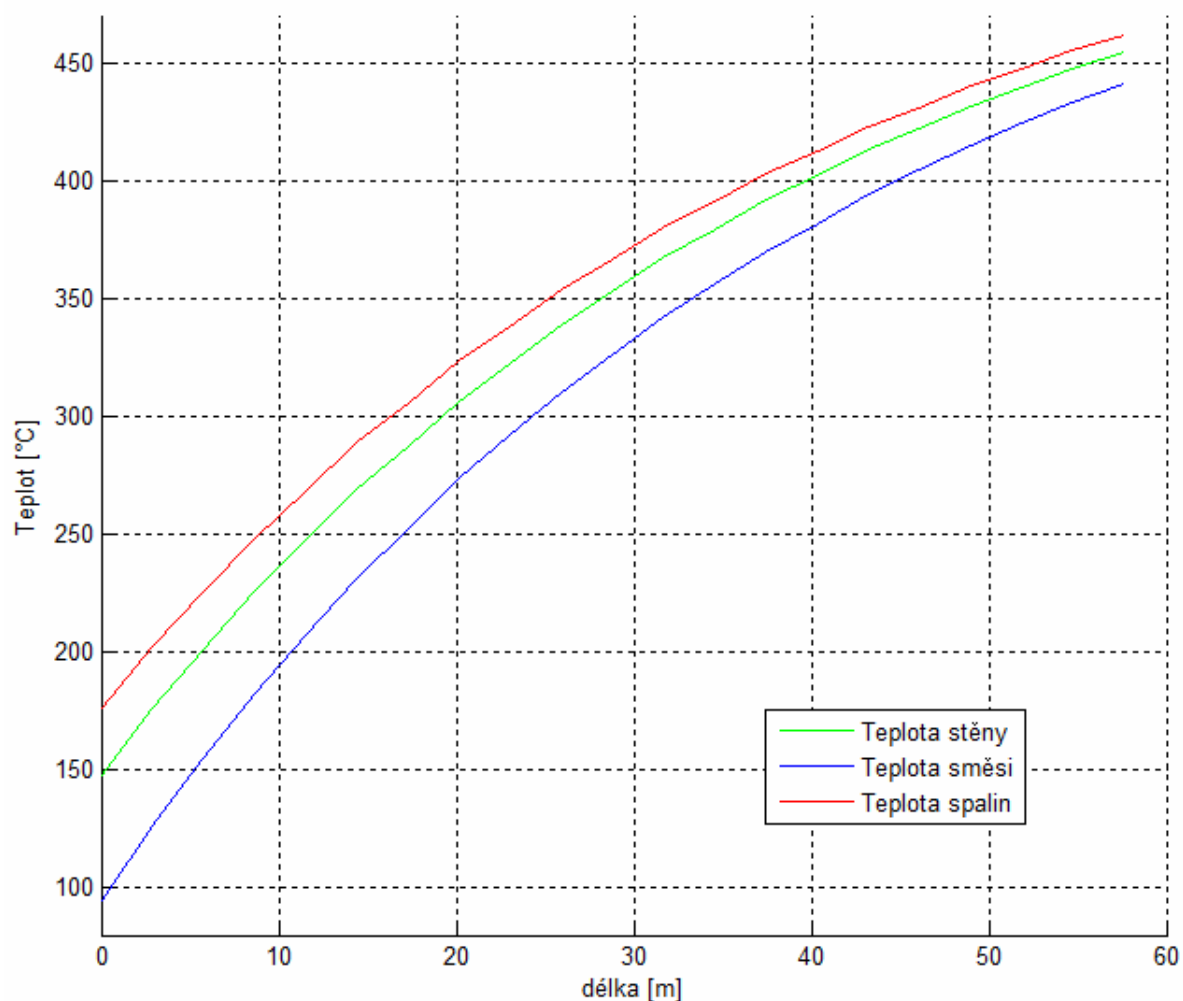
4.4. Výpočet ustáleného stavu výměníku

K výpočtu ustáleného stavu se využije algoritmus popsáný v kapitole 4.2 s dosazením navržených koeficientů α_1 a α_2 a doplněním bloku pro vykreslení výsledného průběhu do grafu. Změny teplot uvnitř výměníku jsou simulovány po dobu 20 hodin. Poté je stav považován za ustálený. Věník tepla se rozdělí na 20 úseků (obrázek 2), to znamená, že teploty jsou určeny v 21 řezech.



Obr. 8 Vývojový diagram – výpočet ustáleného stavu výměníku

Rozložení teplot po délce výměníku ukazuje obrázek 9. Červená barva označuje teplotu spalin, zelená barva označuje teplotu stěny a modrá barva označuje příslušnost k teplotě směsi.



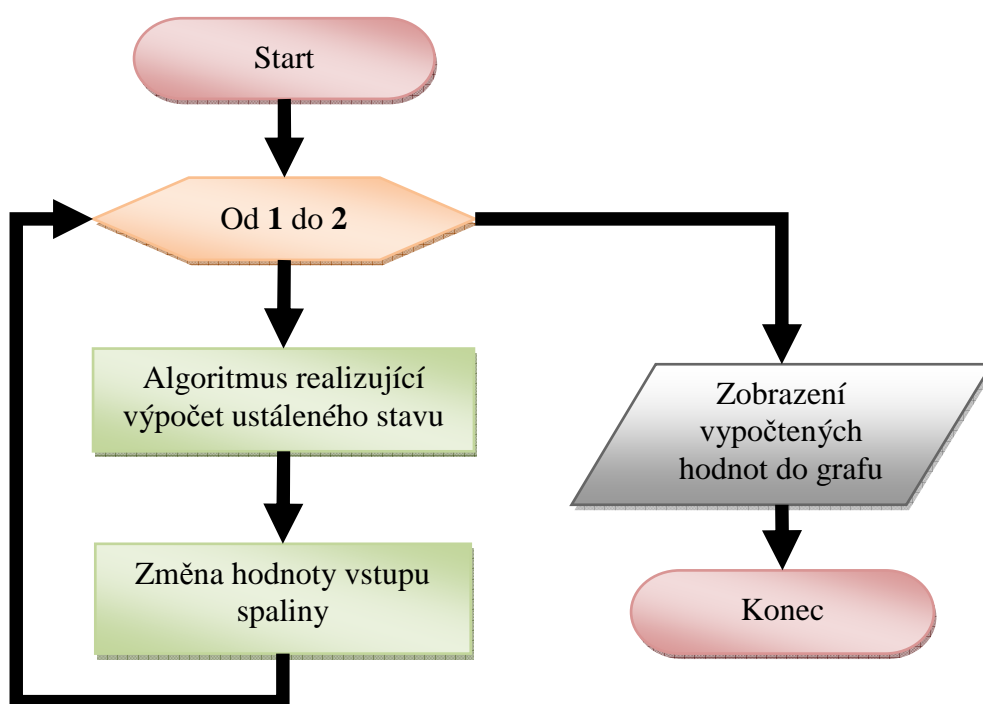
Obr. 9 Ustálená stav výměníku

Z grafu je patrné rozložení teplot po délce výměníku. Nejteplejším médiem ve výměníku jsou spaliny, poté teplota stěny, která odděluje spaliny od směsi. Nejchladnějším médiem ve výměníku je ohřívaná směs. Z grafu je vidět jakým způsobem dochází k výměně tepla mezi jednotlivými médii.

4.5. Odezvy teplot modelu na změnu vstupu

Změnu teploty páry nebo horkých spalin na vstupu výměníku je označena jako porucha, tato změna je obvykle skoková. Simuluje se změna vstupní teploty páry a horkých spalin, a sleduje se jak bude systém reagovat. Jako velikost poruchy se zvolí například skoková změna o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato porucha nastává v době kdy je výměník v ustáleném stavu.

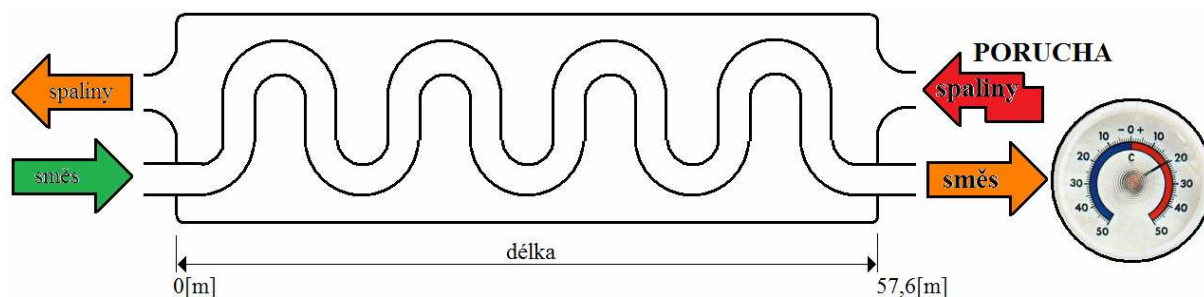
Na obrázku 10 je uveden vývojový diagram, který programově simuluje vznik poruchy na vstupu spalin do výměníku tepla. Nejprve je programem vypočteno rozložení teplot v ustáleném stavu. Následně je přivedena skoková změna na vstup spalin. Po přivedení poruchy na vstup se sleduje změna teploty spalin, páry a teplota stěny na straně výstupu směsí. Odezva na poruchu je simulována po dobu 8 hodin, poté se považuje odezva stavu výměníku za ustálenou.



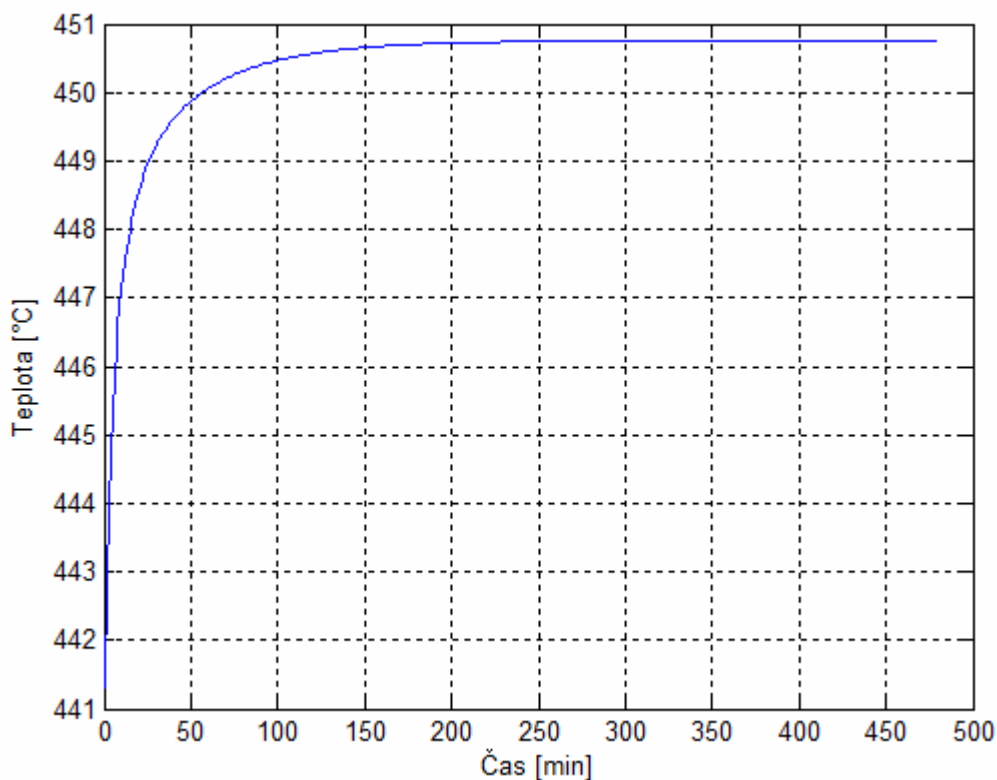
Obr. 10 Vývojový diagram – simulace poruchy

Následující text a grafy ukazují odezvy na vstup poruchy do výměníku tepla.

Stav výměníku, do kterého vstupuje porucha je graficky znázorněn na obrázku 11. V případě výskytu poruchy na vstupu spalín je ovlivňována teplota spalín i směsi, teplota vstupní směsi se nemění. Jako hlavní parametr se sleduje odezva teploty směsi na výstupu z výměníku tepla. Průběh odezvy teploty směsi na výstupu výměníku tepla (konec výměníku tepla) je uveden na obrázku 12. Odezva je uvedena pro skokovou změnu teploty spalín na vstupu do výměníku o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (konec výměníku tepla).

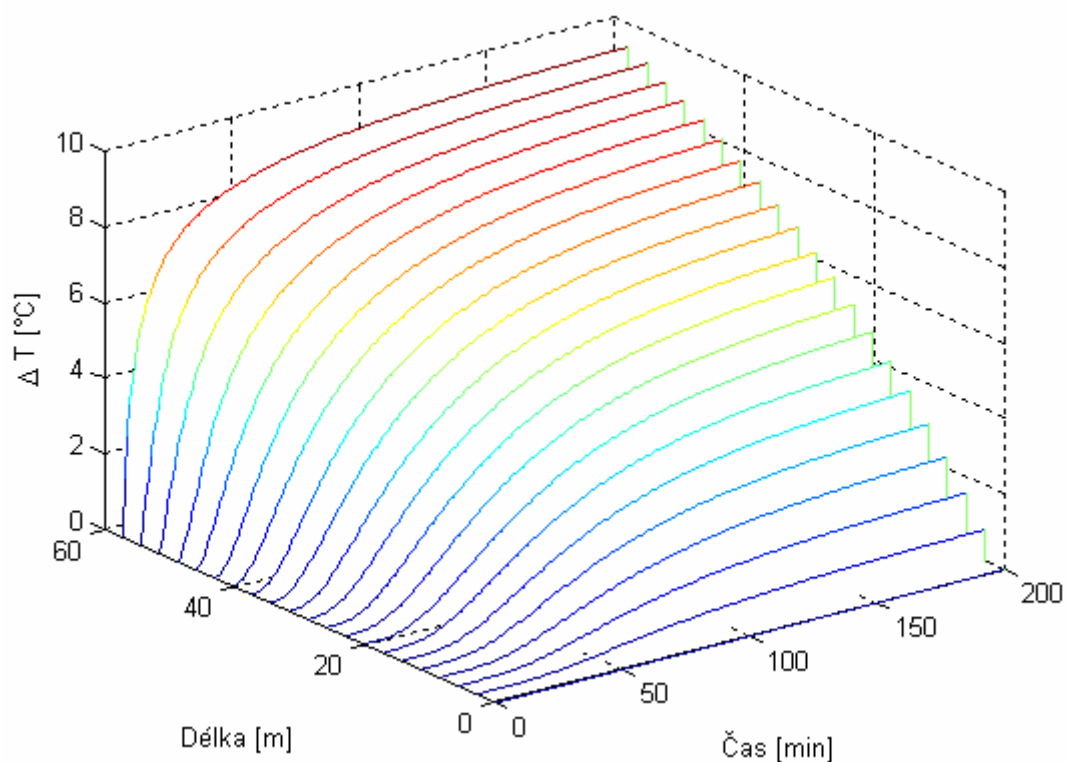


Obr. 11. Blokové schéma modelu – měření odezvy na poruchu



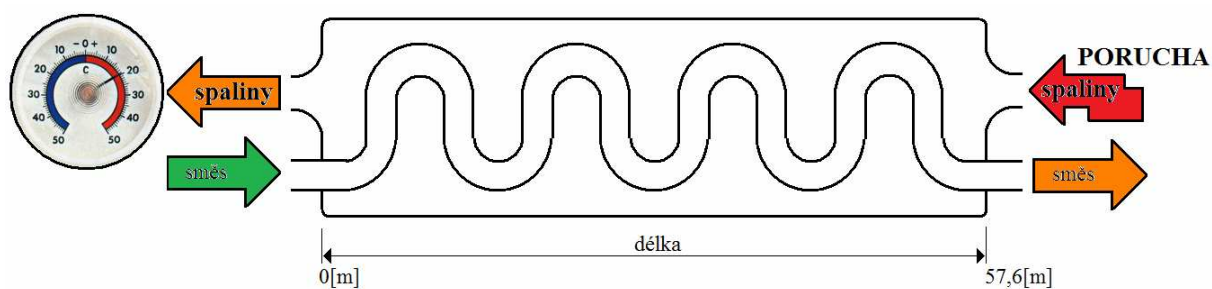
Obr. 12. Odezva teploty směsi modelu na změnu teploty spalín o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Způsob jakým se šíří porucha po délce výměníku ve vedení směsi v čase je uveden na obrázku 13. Je vidět že největší výchylka od ustáleného stavu je způsobena ve vedení směsi poruchou na výstupu směsi z výměníku.

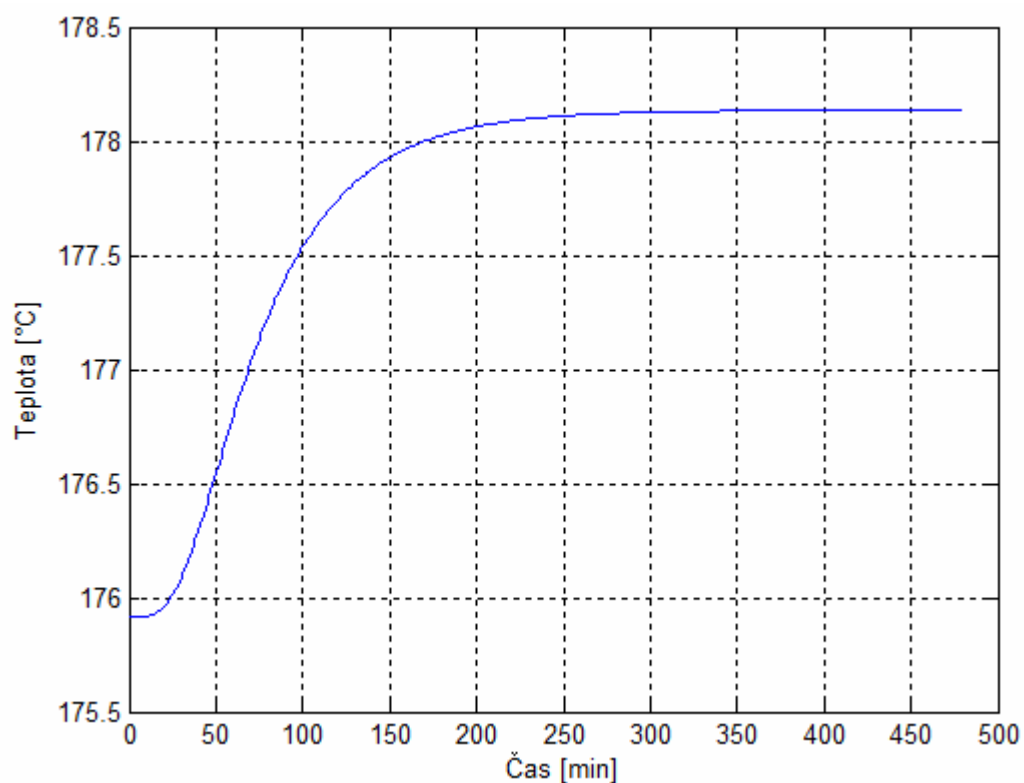


Obr. 13. Šíření poruchy na straně vstupu spalin vedením směsí

Stav výměníku, do kterého vstupuje porucha je graficky znázorněn na obrázku 14. V případě výskytu poruchy na vstupu spalin je ovlivněna teplota spalin i směsi, teplota vstupní směsi se nemění. Jako hlavní parametr se sleduje odezva teploty spalin na výstupu z výměníku tepla. Průběh odezvy teploty spalin na výstupu výměníku tepla je uveden na obrázku 15. Odezva se uvádí pro skokovou změnu teploty spalin na vstupu do výměníku o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

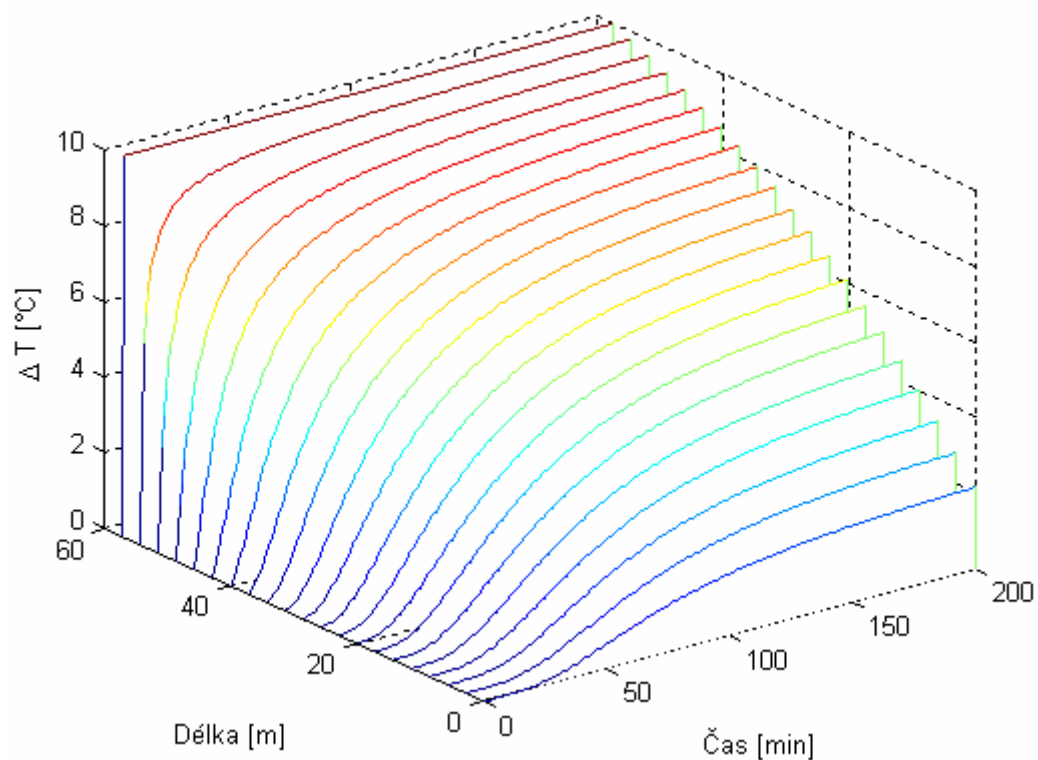


Obr. 14. Blokové schéma modelu – měření odezvy na poruchu



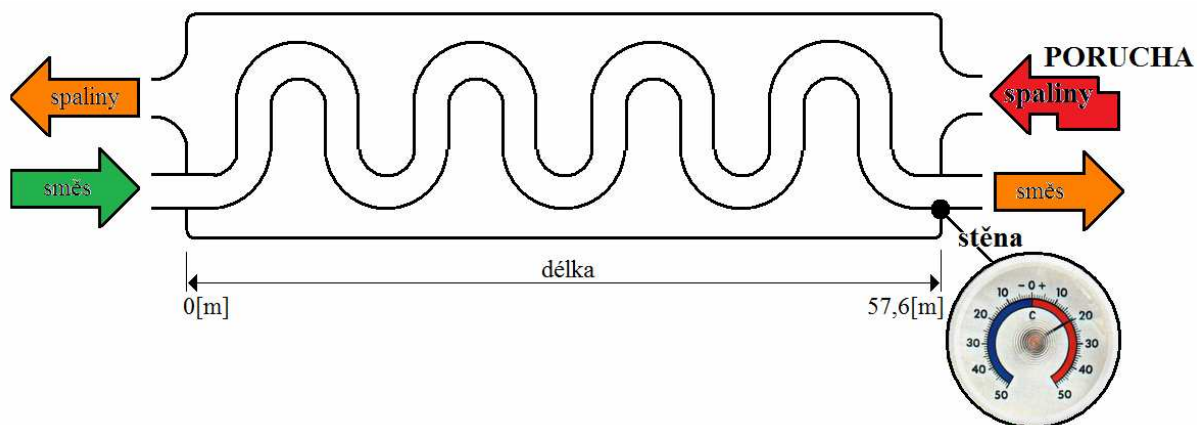
Obr. 15. Odezva teploty spalín modelu na změnu teploty spalín o +10 °C

Způsobem, kterým se šíří porucha po délce výměníku ve vedení spalín v čase je uveden na obrázku 16. Je vidět že největší výchylka od ustáleného stavu je způsobena ve vedení spalín poruchou na výstupu spalín z výměníku.

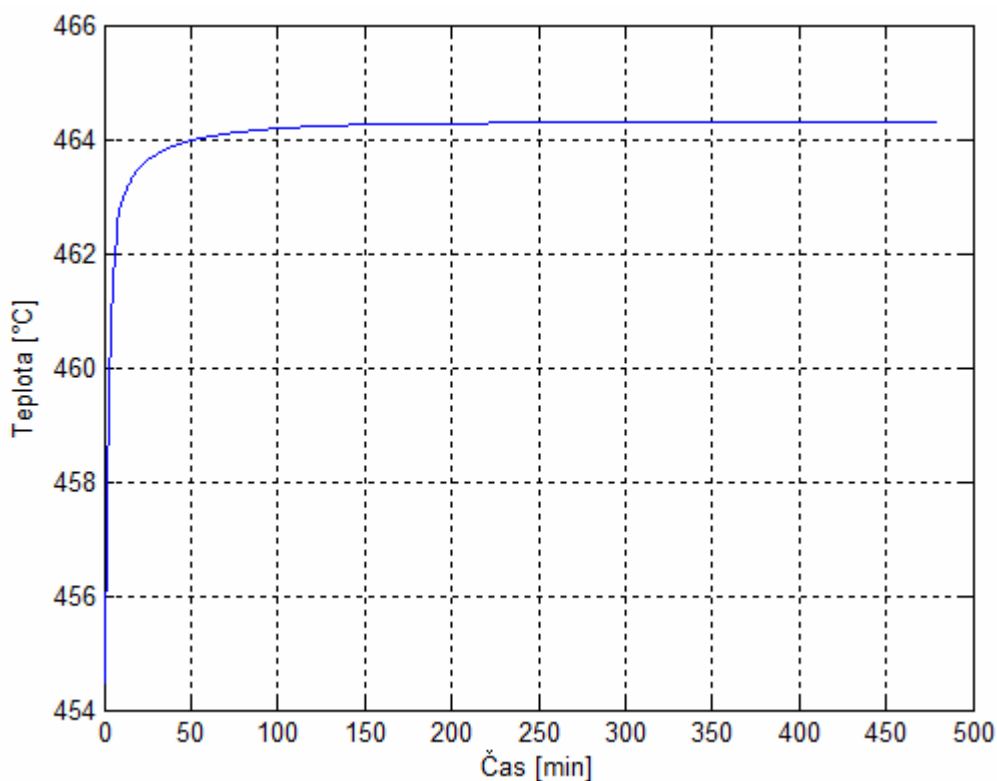


Obr. 16. Šíření poruchy na straně vstupu spalín vedením spalín

Stav výměníku, do kterého vstupuje porucha je graficky znázorněn na obrázku 17. V případě výskytu poruchy na vstupu spalín je ovlivněna teplota výstupu spalín i směsi, teplota vstupní směsi se nemění. Jako hlavní parametr se sleduje odezva teploty stěny mezi médii na straně vstupu poruchy. Průběh odezvy teploty stěny na výstupu výměníku tepla je uveden na obrázku 18. Odezva se uvádí pro skokovou změnu teploty spalín na vstupu do výměníku o $+10^{\circ}\text{C}$.

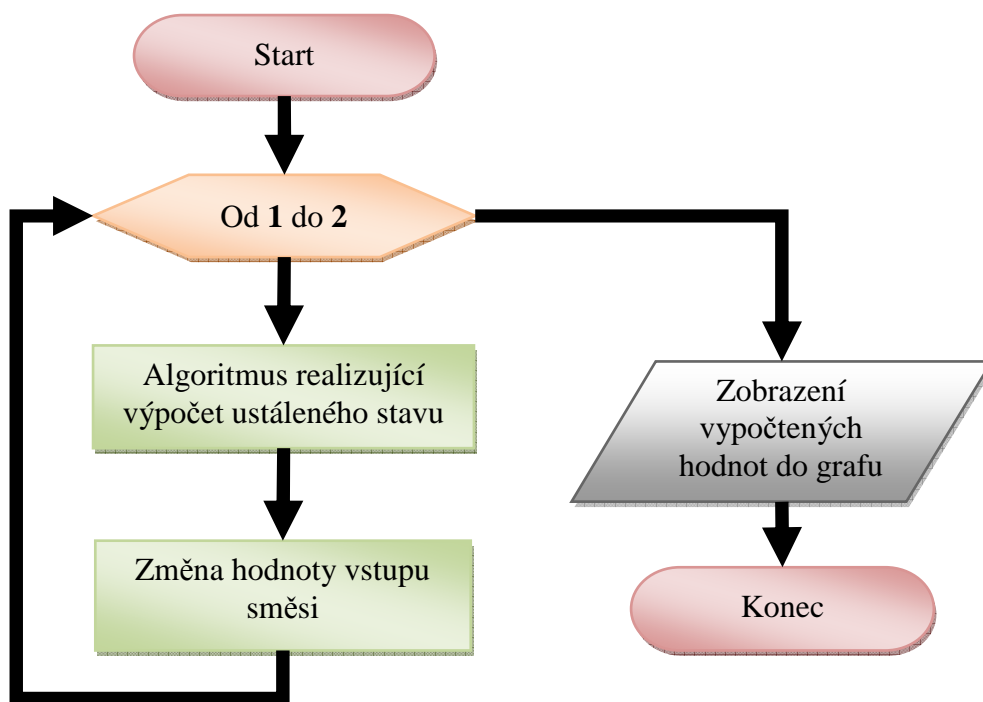


Obr. 17. Blokové schéma modelu – měření odezvy na poruchu



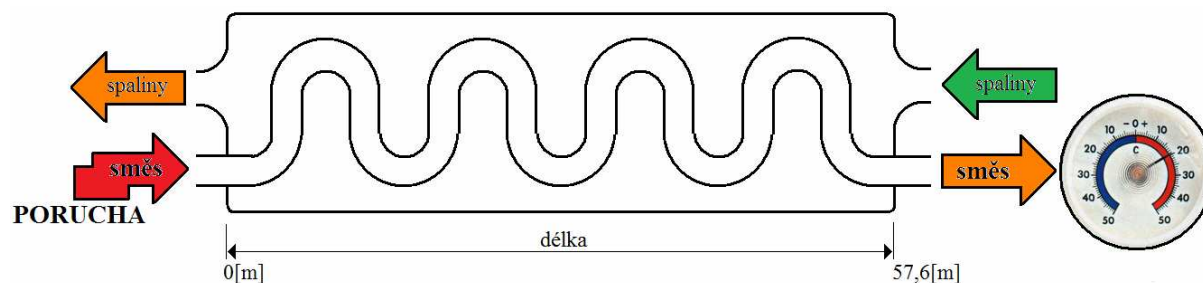
Obr. 18. Odezva teploty stěny modelu na změnu teploty spalín o $+10^{\circ}\text{C}$

Vývojový diagram, který programově simuluje vznik poruchy na vstupu směsi do výměníku tepla je uveden na obrázku 19. Nejprve je programem vypočteno rozložení teplot v ustáleném stavu. Následně se přivádí skoková změna na vstup směsi. Po přivedení poruchy na vstup se sleduje změna teploty spalin, páry a teplota stěny na straně výstupu směsi. Odezva na poruchu je simulována po dobu 8 hodin, poté se považuje odezva stavu výměníku za ustálenou.

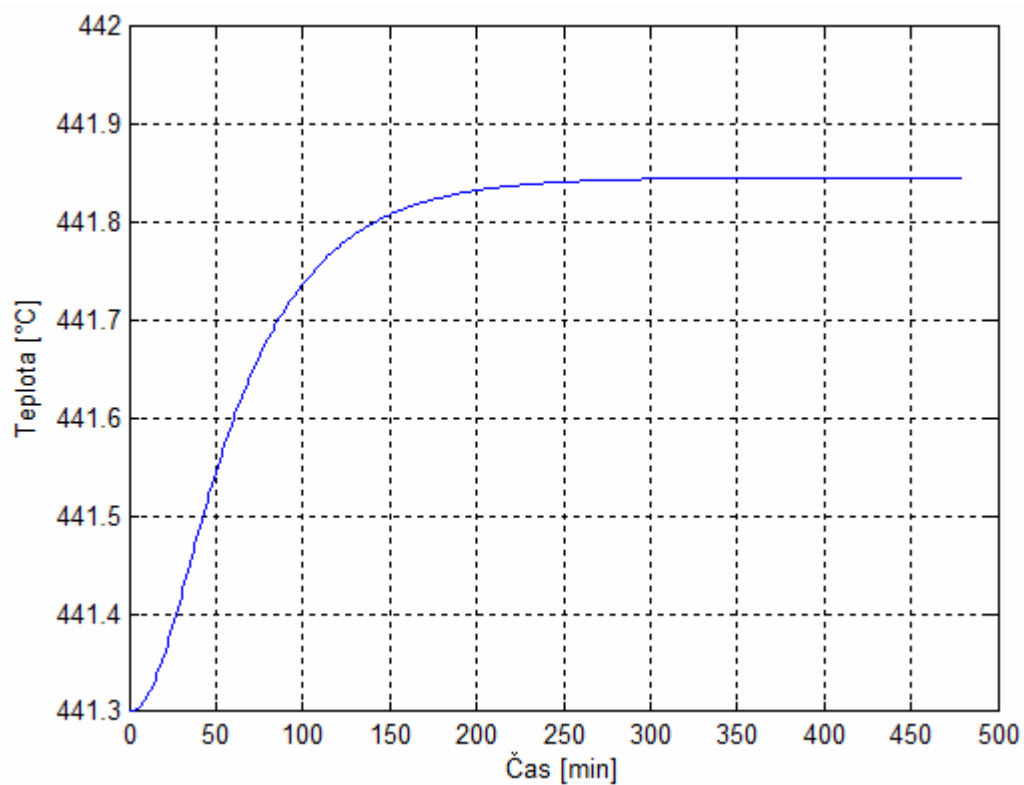


Obr. 19. Vývojový diagram – simulace poruchy

Stav výměníku, do kterého vstupuje porucha je graficky znázorněn na obrázku 20. V případě výskytu poruchy na vstupu směsi je ovlivněna teplota výstupu spalin i směsi, teplota vstupních spalin se nemění. Jako hlavní parametr se sleduje odezva teploty směsi na výstupu z výměníku tepla. Průběh odezvy teploty směsi na výstupu výměníku tepla je uveden na obrázku 21. Odezva se uvádí pro skokovou změnu teploty směsi na vstupu do výměníku o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

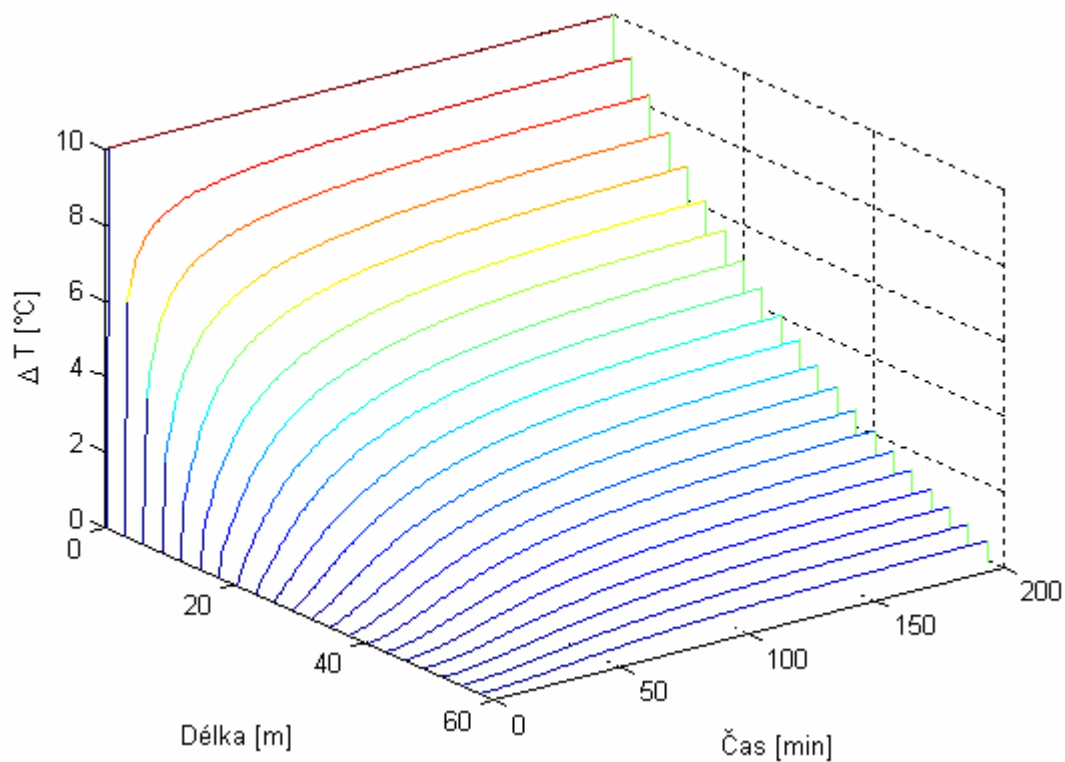


Obr. 20. Blokové schéma modelu – měření odezvy na poruchu



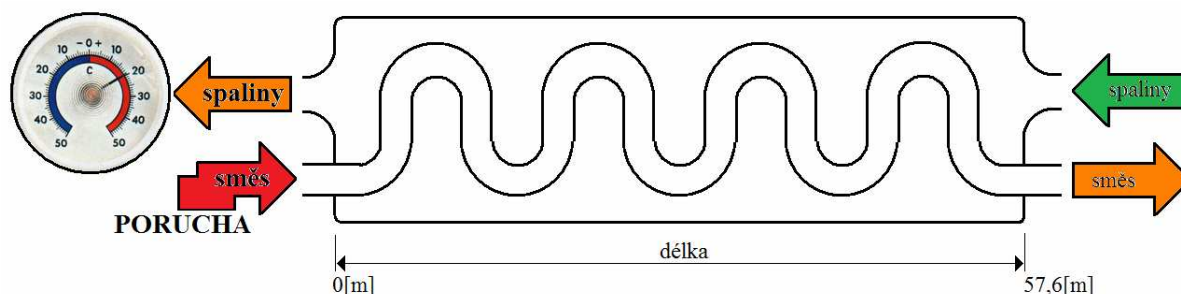
Obr. 21. Odezva teploty směsi modelu na změnu teploty směsi o +10 °C

Způsobem jakým se šíří porucha po délce výměníku ve vedení směsi v čase je uveden an obrázku 22. Je vidět že největší výchylka od ustáleného stavu je způsobena ve vedení směsi poruchou na výstupu směsi z výměníku.

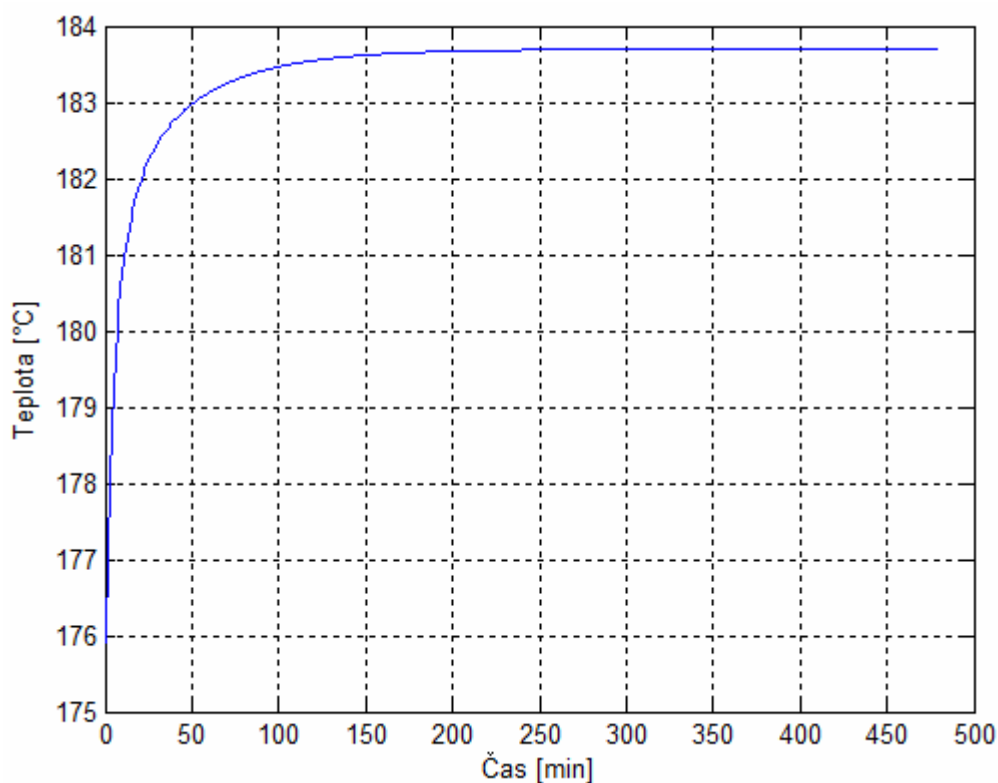


Obr. 22. Šíření poruchy na straně vstupu směsi vedením směsi

Stav výměníku, do kterého vstupuje porucha je graficky znázorněn na obrázku 23. V případě výskytu poruchy na vstupu směsi je ovlivněna teplota výstupu spalin i směsi, teplota vstupních spalin se nemění. Jako hlavní parametr se sleduje odezva teploty spalin na výstupu z výměníku tepla. Průběh odezvy teploty spalin na výstupu výměníku tepla je uveden na obrázku 24. Odezva se uvádí pro skokovou změnu teploty směsi na vstupu do výměníku o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

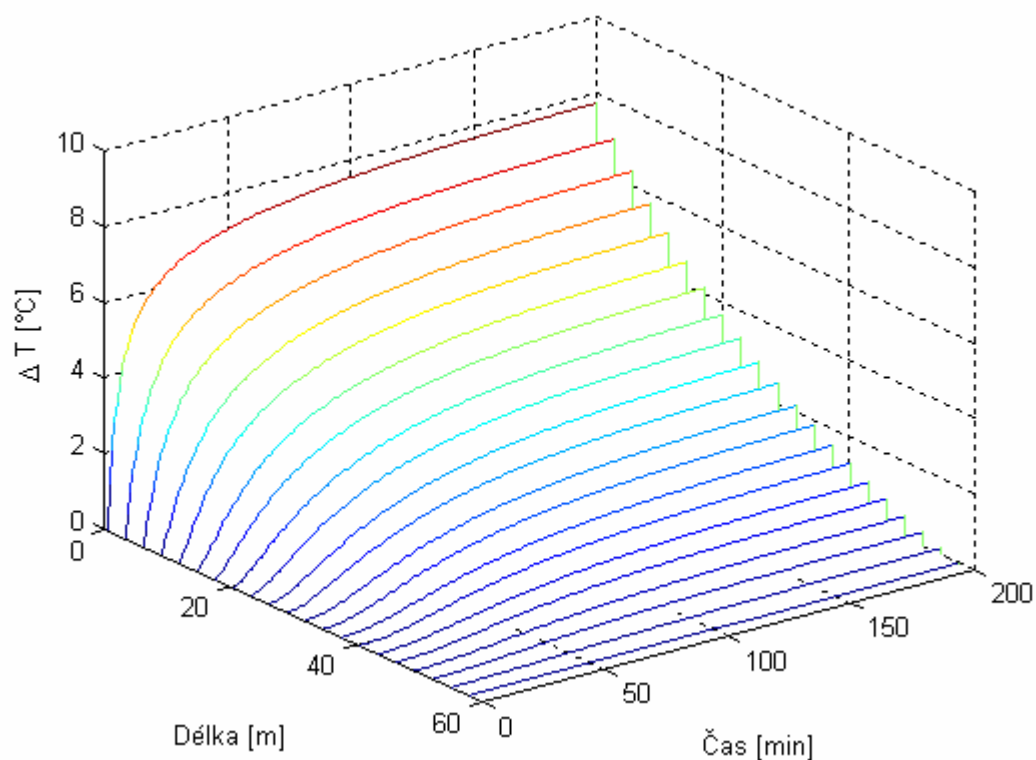


Obr. 23. Blokové schéma modelu – měření odezvy na poruchu



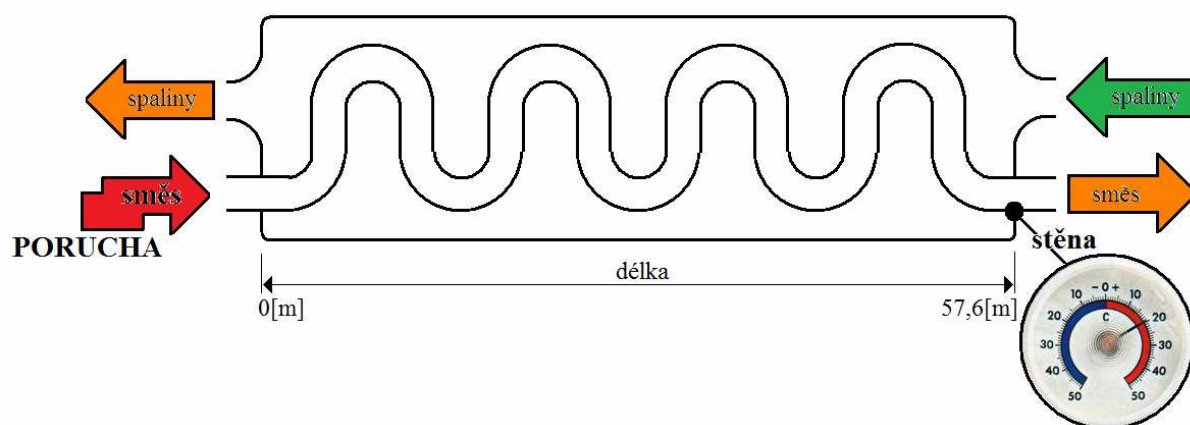
Obr. 24. Odezva teploty spalin modelu na změnu teploty směsi o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Způsob jakým se šíří porucha po délce výměníku ve vedení spalin v čase je uveden na obrázku 25. Je vidět že největší výchylka od ustáleného stavu je způsobena ve vedení spalin poruchou na výstupu spalin z výměníku.

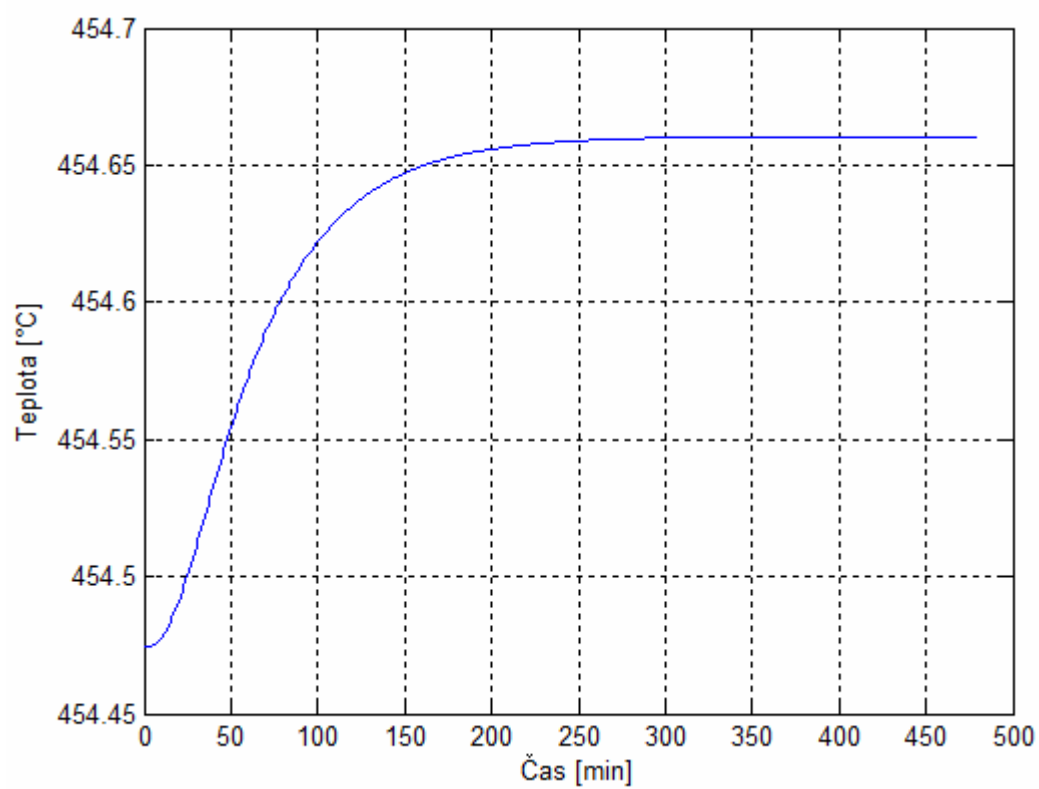


Obr. 25 Šíření poruchy na straně vstupu směsi vedením spalín

Stav výměníku, do kterého vstupuje porucha je graficky znázorněn na obrázku 26. V případě výskytu poruchy na vstupu spalín je ovlivněna teplota výstupu spalín i směsi, teplota vstupní směsi se nemění. Jako hlavní parametr se sleduje odezva teploty stěny mezi médii na straně vstupu poruchy. Průběh odezvy teploty stěny na výstupu výměníku tepla je uveden na obrázku 27. Odezva je uvedena pro skokovou změnu teploty směsi na vstupu do výměníku o $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 26. Blokové schéma modelu – měření odezvy na poruchu



Obr. 27 Odezva teploty stěny modelu na změnu teploty směsi o +10 °C

5. Shrnutí výsledků a závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření modelu pro výpočet dynamiky teplotních změn uvnitř výměníku tepla. V rámci této práce byl navrhnout systém řešení v programu Matlab, který ukazuje způsob výpočtu na modelové úloze. V této souvislosti byl sestaven zjednodušený model výměníku tepla.

Návrh řešení se skládá z několika částí. Nejprve byl zjednodušený model matematicky popsán a byla zvolena vhodná matematická metoda řešení. Byl navržen algoritmus pro výpočet hodnot přestupních součinitelů tepla α_1 a α_2 mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem. Dále byl sestaven algoritmus pro výpočet ustáleného stavu průběhu teplot ve výměníku. V rámci modelové úlohy byly navrženy algoritmy pro sledování odezev na změnu vstupní teploty média, respektive na skokovou změnu vstupní teploty páry a směsi.

Při určení ustálených průběhu uvnitř výměníku tepla probíhala simulace po dobu 20 hodin. Po tomto čase se systémy považovaly za ustálené.

Výsledné průběhy ukazují, jakým způsobem systém reaguje na vstupní poruchy. Poruchy byly simulovány na vstupu spalín a směsi. Odezva na tyto poruchy byla sledována po dobu 480 minut. Z výsledných průběhů je vidět že při přivedení poruchy na vstup spalín, velmi rychle a výrazně reaguje výstupní teplota směsi. Při přivedení poruchy vstup směsi nejvýrazněji reaguje výstupní teplota spalín.

Navržené řešení ukazuje, jakým způsobem lze vypočítat dynamické charakteristiky takového systému. Při řešení systému je nutné znát s co největší přesností hodnotu přestupního součinitele tepla α_1 a α_2 mezi povrchem teplosměnné plochy a médiem. Tento koeficient je obtížné změřit či odhadnout, protože závisí na technologii výroby a uspořádání částí výměníku. Proto byl navržen algoritmus, který realizuje výpočet těchto koeficientů s vysokou přesností. Pro takto vypočtené konstanty bylo dosaženo odchylky od výstupní teploty směsi pouze 0,00023 % a odchylky od výstupní teploty spalín 0,5232 %. Při simulaci poruchy na vstupu do výměníku tepla byla zvolena velikost poruchy + 10 °C. Takto zvolená hodnota je v praxi příliš vysoká, neboť je potřeba brát v úvahu teplotní roztažnosti materiálů. Velikost vstupní poruchy byla zvolena z důvodu názornosti.

Změna výstupních teplot nebo kompenzace vzniklých poruch se provádí za pomoci regulátoru. Při zásahu regulátoru nejsou tyto změny vstupních veličin považovány za poruchy, jsou akčními veličinami. Práce proto může sloužit jako podklad pro návrh regulátoru k takovému systému.

Literatura:

- [1] NEVŘIVA, Pavel. Simulace řídicích systémů na číslicovém počítači. 1975. vyd. Praha 1 : SNTL, 1975. 136 s.
- [2] SLAVÍČEK, Oldřich. Základní numerické metody. 1964. vyd. Praha : SNTL, 1964 tisk. 350 s.
- [3] MATĚJKA, Radomír, et al. Výpočet dynamických vlastností přehříváků páry. 1969. vyd. Ostrava : [s.n.], 1969 tisk. 98 s.
- [4] SEDLÁČEK, Miloš, ŠMÍD, Radislav. Matlab v Měření. Praha : ČVUT, 2005. 204 s.
- [5] HANUŠ, B. *Regulační charakteristiky přehříváčů páry u kotlů československé výroby*. [s.l.], c1961. 6 s. Zpráva.
- [6] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné turbíny a turbokompresory I : základy teorie a výpočtů*. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 2005. 308 s. ISBN 80-7204-346-3.
- [7] KAMEN, Edward W., HECK, Bonnie S. *Fundamentals of Signals and Systems*. New Jersey : Prentice Hall Inc, 2000.
- [8] CHI-TSONG, Chen. *System and Signal Analysis*.: Saunders College Publishing, 1994.
- [9] *Matlab Documentacion*.: Math-Works Inc., 2000 - 2004.
- [10] MACUR, Jiří. *Numerické metody* [online]. [2000] [cit. 2008-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.fce.vutbr.cz/studium/materialy/Dynsys/kap7/kap7.htm>>
- [11] *Wikipedie* [online]. 1995 [cit. 2008-12-28]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Wiki>>.

Přílohy:

- Příloha č. 1:** Zdrojový kód pro výpočet koeficientů α_1 a α_2 .
(VypocetAlfa.m)
- Příloha č. 2:** Zdrojový kód pro výpočet průběhu teplot v ustáleném stavu výměníku tepla.
(UstalenyStavProtiproudyVymenik.m)
- Příloha č. 3:** Zdrojový kód pro výpočet průběhu odezvy na změnu vstupní teploty spalin. Odezva je sledována na výstupu média z výměníku.
(OdezvaNaChybuSpalin.m)
- Příloha č. 4:** Zdrojový kód pro výpočet průběhu odezvy výměníku na změnu vstupní teploty spalin. Odezva je zobrazena pro průběhy uvnitř celého výměníku tepla.
(OdezvaNaChybuSpalinTrojrozmerne.m)
- Příloha č. 5:** Zdrojový kód pro výpočet průběhu odezvy na změnu vstupní teploty směsi. Odezva je sledována na výstupu média z výměníku.
(OdezvaNaChybuSmesi.m)
- Příloha č. 6:** Zdrojový kód pro výpočet průběhu odezvy výměníku na změnu vstupní teploty směsi. Odezva je zobrazena pro průběhy uvnitř celého výměníku tepla.
(OdezvaNaChybuSmesiTrojrozmerne.m)